



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**ZPŮSOBY NÁHONU LINEÁRNÍ POSUVOVÉ SOUSTAVY A
DRUHY LINEÁRNÍCH VEDENÍ CNC OBRÁBĚCÍCH
STROJŮ**

DRIVING METHODS OF LINEAR SYSTEM AND GUIDING TYPES OF CNC BORING MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Rolinc

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Lukáš Rolinc**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Způsoby náhonu lineární posuvové soustavy a druhy lineárních vedení CNC obráběcích strojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Záměrem bakalářské práce je rozdělit a popsat způsoby náhonu lineární posuvové soustavy, prezentovat obecný postup pro jejich navržení a provést jejich jednotlivé kritické zhodnocení z hlediska použití, výhod a nevýhod jednotlivých druhů. Navazujícím úkolem je uvést a charakterizovat druhy lineárního vedení CNC obráběcích strojů. V závěru práce je nutné uvést druhy ochrany vedení před jejich možným poškozením a celkové shrnutí celé práce s doporučením pro praxi. K práci využijte mimo jiné zdroje informací i dostupné internetové odkazy společností vyrábějící komponenty k obráběcím strojům.

Cíle bakalářské práce:

Úvod do problematiky.

Definice pojmu CNC obráběcí stroje a jejich základní rozdělení.

Způsoby náhonu lineární posuvové soustavy s možnostmi jako jsou kuličkový šroub a matice, pastorek a hřeben, šnek a šnekový hřeben a lineární elektromotor, atd.

Druhy vedení translačních pohybových jednotek CNC obráběcích strojů (kluzné, valivé, kombinované, aerostatické, atd.).

Ochrana lineárních vedení.

Kritické zhodnocení současného stavu, uvedení výhod a nevýhod, oblasti použití jednotlivých řešení.

Závěr a doporučení pro projektanty a konstruktéry obráběcích strojů.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá možnými způsoby náhonu, posuvu a druhy lineárních vedení využitelných pro konstrukci CNC obráběcích strojů. Dále jsou popsány prvky sloužící k ochraně vedení a odměřování polohy. V práci je zmíněna důležitost volby vhodného mazání strojů a jsou uvedeny jeho realizovatelné způsoby. V závěru práce se nachází kritické zhodnocení stěžejních témat popsaných výše s uvedením jejich výhod, nevýhod a doporučením vhodnosti jejich aplikace v oblasti konstrukce CNC obráběcích strojů.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with possible driving and shifting methods and types of linear driving solutions that can be used to fabricate CNC machining machines. This is followed by a description of the safety elements assigned to protect navigating and axis metering. This thesis also mentions how important is the choice of how to adequately lubricate the machines and introduces its ways of how to put this lubrication into practise. The final part of this thesis is devoted to a critical evaluation of the above mentioned topics. It is mentioning its advantages, disadvantages and recommendations on how they are suitable to be used for different CNC machining machine constructions.

KLÍČOVÁ SLOVA

Způsoby náhonu lineární posuvové soustavy, způsoby posuvu lineární posuvové soustavy, druhy lineárních vedení, ochrana vedení, odměřování polohy, mazání stroje

KEYWORDS

Driving methods of linear servo system, shifting methods of linear servo system, linear guide types, guide protection, position measurement, machinery lubrication

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ROLINC, L. *Způsoby náhonu lineární posuvové soustavy a druhy lineárních vedení CNC obráběcích strojů*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2017, 55 s., Vedoucí diplomové/bakalářské práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Radka Knoflíčka, Dr. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25.5.2017

.....
Lukáš Rolinc

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu panu doc. Ing. Radku Knoflíčkovi, Dr. za odborné vedení, vstřícný přístup, ochotu a poskytování cenných rad při vypracování této práce. Děkuji také svým rodičům a blízkým, za jejich podporu během studia.

Obsah

Úvod.....	10
1 Definice pojmu CNC obráběcí stroje a jejich základní rozdělení.....	11
2 Způsoby náhonu lineární posuvové soustavy	12
2.1 Obecný postup návržení náhonové jednotky.....	12
2.2 Rotační motor	15
2.2.1. Synchronní motor.....	15
2.2.2. Asynchronní motor	15
2.2.3. Krokový motor.....	16
2.3 Lineární motor	17
3 Způsoby posuvu lineární posuvové soustavy.....	18
3.1 Kuličkový šroub a matice	18
3.2 Pastorek a hřeben.....	22
3.3 Šnek a šnekový hřeben	24
4 Druhy vedení CNC obráběcích strojů.....	25
4.1 Kluzné.....	25
4.1.1. Hydrodynamické.....	26
4.1.2. Hydrostatické	29
4.2 Valivé.....	32
4.2.1 Vedení s omezenou délkou zdvihu.....	33
4.2.2 Vedení s neomezenou délkou zdvihu.....	33
4.3 Aerostatické	35
4.4 Kombinované.....	35
5 Ochrana vedení	36
5.1 Teleskopické kryty	36
5.2 Krycí měchy	37
5.3 Rolety.....	39
5.4 Člákové zástěny.....	39
5.5 Teleskopické pružiny.....	40
5.6 Stírací systémy.....	40
6 Odměřování polohy	41
7 Mazání.....	43
8 Kritické zhodnocení	44
Závěr.....	47

Seznam použité literatury	48
Seznam použitých zkratek a symbolů	53
Seznam obrázků	54
Seznam tabulek	55

Úvod

CNC obráběcí stroje jsou bez nadsázky nenahraditelnými prvky každého strojírenského průmyslu jakékoliv vyspělé země. Do jejich vývoje jsou velmi často investovány nemalé finanční prostředky. Abychom však byli schopni konstruovat inovativní spolehlivé stroje, musíme nejprve také porozumět jejich základním problematikám a principům. V průběhu této bakalářské práce bude čtenář seznámen se základním rozdělením obráběcích strojů, realizovatelnými způsoby náhonu, obecným postupem jejich navržení, způsobu posuvu a druhy vedení využívaných při jejich konstrukci. Budou interpretovány možné druhy ochrany vedení a jiných komponent nalézajících se na jednotlivých osách stroje. Bude mimo jiné také vysvětlen princip odměřování polohy včetně uvedení několika příkladů. Vysvětlena bude i důležitost vhodné volby mazání. U všech výše zmíněných charakteristik budou uvedeny jejich výhody a nevýhody, které budou opěrným bodem pro kritické zhodnocení s doporučeným užitím pro specifické strojní aplikace v závěrečné části práce.

1 Definice pojmu CNC obráběcí stroje a jejich základní rozdělení

Před samotným vymezením tohoto pojmu, je nezbytné si na úvod vysvětlit pojem CNC. Tato z angličtiny vycházející zkratka označuje počítačové číslicové řízení (Computer Numerical Control). Tento typ řízení stroje nahradil dřívější, pouze číslicové řízení stroje (Numerical Control, zkratkou označováno NC). [1] Počítačové číslicové řízené stroje (CNC stroje) jsou moderním nahrazením dřívějších, číslicově řízených strojů (NC strojů). [2]

Hlavní rozdíl mezi CNC stroji a NC stroji je tedy přítomnost počítače. Tato změna měla za důsledek také změnu nosiče informace o obrábění. Zatímco uložištěm této informace u NC strojů jsou „mechanické paměti v podobě šablon, váček nebo mechanických zarážek, které byly postupně nahrazovány optickými snímači a děrnými páskami“ [2], u CNC strojů jsou to elektronické soubory. „Díky počítači došlo nejen k uchovávání dat k pozdějšímu využití a změnám, ale výrazně se zjednodušil a urychlil samotný proces programování a řízení strojů.“ [2]

Rozdělení CNC obráběcích strojů záleží na hledisku, podle kterého budeme stroje rozlišovat. Obecně můžeme učinit základní rozdělení podle hledisek uvedených na Obr. 1. Na základě specifických požadavků zákazníka mohou však vznikat také stroje, tvořící kombinaci jednotlivých skupin. [3]

CNC obráběcí stroje					
počet technologických operací	druh operace	hlavní pohyb obrobek	hlavní pohyb nástroj	kinematika	technologie odebrání třísek
<ul style="list-style-type: none"> • jednoprofesní stroje • obráběcí centra • víceúčelová obráběcí centra 	<ul style="list-style-type: none"> • vrtací a závitovací • vyvrtávací • soustružnické • frézovací • brousící • ozubárenská 	<ul style="list-style-type: none"> • soustruh (R) • bruska (R) • frézka (T) 	<ul style="list-style-type: none"> • vrtačka a závitovačka • vyvrtávačka • ozubárenský stroj 	<ul style="list-style-type: none"> • sériová • paralelní • smíšená 	<ul style="list-style-type: none"> • vysokorychlostní (HSC) • vysokovýkonné (HPC) • suché • obvyklé

Obr. 1 Rozdělení CNC obráběcích strojů [3]



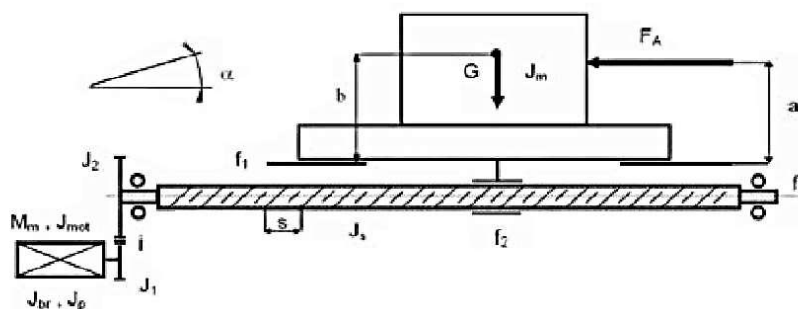
Obr. 2 Ukázka CNC obráběcího stroje - vodorovné vyvrtávačky WFC 10 fa. FERMAT [28]

2 Způsoby náhonu lineární posuvové soustavy

Posouvanou část stroje můžeme pohánět dvěma základními druhy pohonu. Jedním z nich je rotační motor, nazýván též jako servopohon a druhým je lineární motor. Ještě předtím, než si jednotlivé druhy náhonů budeme specifikovat, bude uveden obecný postup vedoucí k jejich správnému navržení.

2.1 Obecný postup navržení náhonové jednotky

Při návrhu posuvového motoru osy daného stroje je třeba dbát nejen na splnění požadovaných mechanických vlastností, ale také na splnění bezpečnostních a provozních norem pracovního prostředí. Konkrétně je tímto myšleno splnění podmínek krytí živých částí motoru, vhodného oddělení obvodů malého, nízkého a vysokého napětí, dodržení povolené úrovně chvění, hlukových norem, provozní spolehlivosti a samozřejmě i snadné obsluhy a údržby. Důležitá je i znalost požadovaného provozního režimu stroje a také druh (trvalé, přerušované, rázové) a velikost zatížení, kterému bude motor vystavován. Nezbytné je také správné navržení elektrické stránky pohonu (polovodičových měničů), aby se zabránilo vypadávání elektrické ochrany v důsledku nárůstu proudu při rozběhu pohonu. Výpočetní postup návrhu vhodného motoru pro posuv osy je nezbytné provést z hlediska statického, kinematického a dynamického. Mimo jiné bývá prováděna i kontrola oteplení daného pohonu. Všechny veličiny, je nutné přepočítávat na hřídel motoru. Nejdůležitější počítanou charakteristikou je moment motoru. Pro výpočet je velmi výhodné užití metody redukce. Obecný postup návrhu náhonové jednotky bude interpretován pro osu, ve které je realizován posuv pomocí kuličkového šroubu a matice. Výpočet návrhu motoru pro osu, ve které je realizován posuv pomocí hřebenu a pastorku je velmi podobný a můžeme říct, že také jednodušší. Užití kuličkového šroubu totiž s sebou nese z hlediska návrhu technická omezení, kterými jsou především jeho kritické otáčky a vzpěrná tuhost (maximální axiální síla, kterou může být šroub zatížen). Tyto dvě charakteristiky výpočet pohonu pro osu posouvanou pomocí hřebene a pastorku neobsahuje. Pro obecnou interpretaci návrhu motoru budou použity vztahy vycházející z knihy Konstrukce CNC obráběcích strojů III od Jiřího Marka a kolektivu. V případě užití vztahu z jiného zdroje bude případně blíže specifikováno. [1] [4]



Obr. 3 Schéma výpočtového modelu při realizaci posuvu pomocí KŠM [3]

Ze statického hlediska, musí moment motoru vyvinout dostatečnou axiální sílu, která bude schopna překonat pasivní odpory (v matici KŠ a v ložiscích uložení KŠM), gravitační působení posouváných hmot a síly působící při řezném procesu (obrábění). Celkový statický moment zátěže M_{zsrhm} redukovaný na hřídel motoru je tedy roven

$$M_{zsrhm} = M_{GT} + M_G + M_L + M_{KSM} + M_F \quad [1]$$

kde: M_{zsrhm}	...	celkový statický moment zátěže redukovaný na hřídel motoru	[Nm]
M_{GT}	...	moment tíhové složky	[Nm]
M_G	...	moment potřebný k překonání odporu ve vedení	[Nm]
M_L	...	moment od třecích sil v ložisku	[Nm]
M_{KSM}	...	moment od předepnutí KŠM	[Nm]
M_F	...	třecí moment	[Nm]

Z dynamického hlediska je třeba při návrhu zohlednit dynamičnost. Tedy posuvový cyklus. Ve výpočtu nyní síly působící při obrábění nahradíme silami setrvačnými. S velikostí momentu potřebného k překonání pasivních odporů je ovšem třeba počítat i nyní. Je započten do celkového dynamického momentu zátěže M_{mdyn} , redukovaného na hřídel motoru, který je roven

$$M_{mdyn} = J_{rhm} \cdot \epsilon_m + M_{zdrhm} \quad [1]$$

kde: M_{mdyn}	...	celkový dynamický moment zátěže	[Nm]
J_{rhm}	...	celkový moment setrvačnosti redukovaný na hřídel motoru	[Nm]
ϵ_m	...	úhlové zrychlení	[rad·s ⁻²]
M_{zdrhm}	...	celkový moment zátěže redukovaný na hřídel motoru	[Nm]

Při dynamickém výpočtu je nezbytné také vypočtení vlastní mechanické frekvence daného KŠM. Posuvovou soustavu můžeme modelovat jako:

- Translační (hmota na pružině)
- Torzní (kmitající kotouče)
- Torzně-translační (kinematická vazba v matici kuličkového šroubu)

„Podrobným rozbořem a různým modelováním [Kotina 1985a], [Kotina 1985b] se zjistilo, že jednoduchý torzní model nemodeluje dostatečně přesně posuvový mechanismus. Nejvhodnějším se jeví torzně-translační výpočtový model.“ [1] dle Marka ze str. 223. První mechanická frekvence je dána translační částí mechanismu a je rovna

$$f_{mech} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{sr} \cdot k_{MAT}}{\frac{1}{\frac{k_{sr} \cdot k_{MAT}}{m_{sr} \cdot m}}}} \quad [1]$$

kde: f_{mech}	...	mechanická frekvence	[Hz]
k_{sr}	...	tuhost šroubu	[Nm ⁻¹]
k_{MAT}	...	tuhost matice	[Nm ⁻¹]
m_{sr}	...	hmota šroubu	[kg]
m	...	přesouvaná hmota	[kg]

„Druhá až pátá mechanická frekvence je dána torzní částí. U těžkých strojů s přesouvanou hmotou nad 10 000 kg nejvíce kmitá právě posouvaná hmota a mechanickou frekvenci f_{mech} ovlivňuje nejvíce tuhost šroubu a velikost hmoty. Při posouvání hmot do 3000 kg je dynamika výrazně ovlivněna jeho torzní částí. S rostoucím stoupáním šroubu mechanická frekvence klesá v důsledku uplatnění vlivu torzní části“ [3] dle Marka ze str. 86. Platí, že pro velké stroje by měla být mechanická frekvence $f_{\text{mech}} \geq 20 \text{ Hz}$ a pro malé stroje $f_{\text{mech}} \geq 30 \text{ Hz}$. [3]

Při výpočtech zohledňujících kinematické hledisko je cílem ověřit, zda dojde ke splnění požadovaného zrychlení a rychlosti posouvané části stroje. Nejpodstatnější veličinou, ovlivňující, zda dojde ke splnění, nebo nesplnění kinematického požadavku, jsou otáčky motoru. K interpretaci výpočtu potřebných otáček motoru pro požadovanou rychlost posuvu bude následně užito vztahu z katalogu fa. FANUC [5]

$$V_m = \frac{V}{l} \quad [5]$$

kde: V_m	...	otáčky motoru při rychloposuvu	[min ⁻¹]
V	...	rychlost obrobku při rychloposuvu	[m/min]
l	...	délka posuvu vykonaná za otáčku motoru	[m]

Poslední hlediskem, které je třeba při návrhu pohonu zohlednit, je jeho oteplování během provozu. „Při přeměně elektrické energie v mechanickou práci vznikají v motoru ztráty projevující se vývinem tepla. U vhodně navrženého servopohonu nesmí střední hodnota ztrát překročit dovolenou hodnotu, aby oteplení motoru nepřevýšilo mez stanovenou pro použitou třídu izolace motoru.“ [1] dle Marka ze str. 223. Při návržení pohonu z hlediska oteplení je tedy vhodné postupovat tak, že dílčí velikosti momentů v závislosti na teplotě nahradíme momentem konstantním. Tento konstantní moment poté počítá s ekvivalentním teplotním namáháním a nazývá se efektivní momentu motoru. [3] Jeho hodnotu spočteme dle vztahu

$$M_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n M_j \cdot t_j}{T}} \quad [1]$$

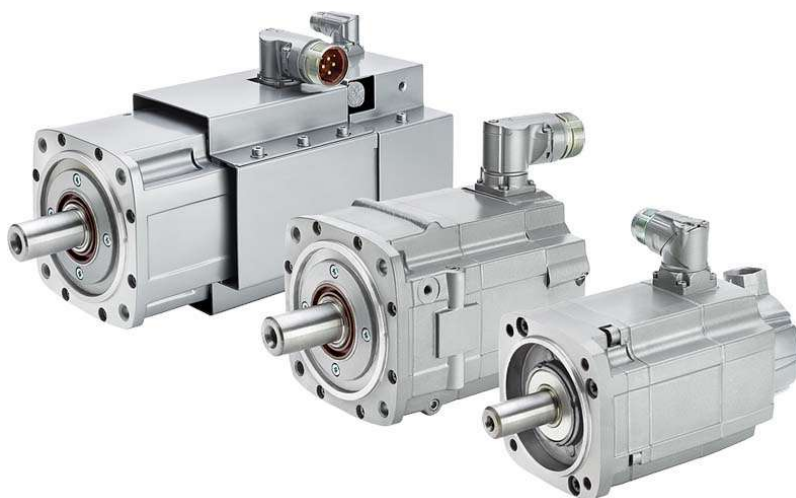
kde: M_{ef}	...	efektivní momentu motoru	[Nm]
M_j	...	dílčí moment během cyklu motoru	[Nm]
t_j	...	čas působení momentu	[s]
T	...	celkový čas	[s]

2.2 Rotační motor

2.2.1. Synchronní motor

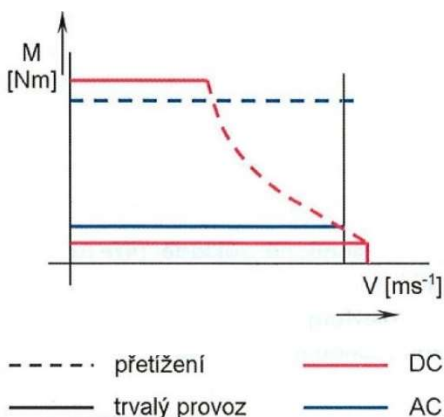
Tento typ elektromotoru je specifický svým použitím, jako pohonné jednotky posuvových os stroje. „Tvoří kvalitativně vyšší typ bezkartáčových elektromotorů založených na současném řízení tří svorkových proudů, které mají harmonické průběhy.“ [1]

Vyznačuje se třífázovým vinutím rozloženým do statorových drážek ve statoru a permanentními magnety umístěnými na rotoru. Méně často se lze ovšem setkat také s umístěním magnetů uvnitř rotoru. Další typickou vlastností je nutnost odměřování polohy rotoru. „Nejpoužívanějším snímačem polohy rotoru je selsyn (resolver).“ [6]



Obr. 4 Synchronní motory SIMOTICS S-1FT7 fa. SIEMENS [29]

Synchronní motor nám na úkor vyšších nákladů nabídne: plynulé řízení, nulové momentové pulzace, dobré krytí (IP65), trvalý start-stop provozní režim a možnost točení v obou směrech. V porovnání s asynchronním motorem (AC) je synchronní motor (DC) odpovídající stejnému výkonu menší a lehčí. Díky faktu, že na rotoru nevznikají tepelné ztráty, není potřeba řešit odvod tepla z rotoru, tedy obecně chlazení. [6]



Obr. 5 Srovnání momentové charakteristiky AC a DC motoru [3]

2.2.2. Asynchronní motor

Asynchronní motor je nejrozšířenější typ motoru. Je specifický robustnější konstrukcí, tři fázovým vinutím statoru a faktem, že magnetické pole není tvořeno magnety, ale indukovanými proudy. Statorové vinutí lze zapojit jak do hvězdy, tak do trojúhelníku. [1] Typickým znakem asynchronního motoru je přítomnost ventilátoru (používaného k chlazení) a snímače otáček, případně polohy. [6]

Nejvýznamnějším zástupcem tohoto druhu motoru je asynchronní motor s klecovou kotvou nakrátko. Na obráběcích strojích ho nacházíme především v aplikaci náhonové jednotky vřetena.



Obr. 6 Asynchronní motory typu QAN fa. HEIDENHAIN [30]

Motory jsou vyráběny v mnoha výkonnostních řadách. Při volbě pohonu vřetena je vhodné volit motor tak, aby odpovídal provozu, ve kterém bude nejčastěji pracovat (charakteristika S1 – trvalý provoz). Při obrábění je ovšem někdy nevyhnutelné motor krátkodobě, popř. periodicky přetěžovat. Je tedy nezbytné také zvážit krátkodobé, popř. periodické výkonnostní charakteristiky (S2, S6, aj.). [1] [6]

2.2.3. Krokový motor

Krokový motor se vyznačuje jedinečným způsobem běhu. Tato odlišnost je způsobena faktem, že v motoru není generováno točivé magnetické pole, ale „poskakující“. „Počet stabilních poloh rotoru je pak dán počtem kroků motoru na jednu otáčku.“ [6]

Motor provede tedy pouze tolik otáček, kolik je mu dáno impulzů. Díky takovému principu fungování motoru není nutné zabudování snímače otáček pro odměřování polohy.

Užití tohoto druhu motoru je poměrně omezené, avšak pro určité aplikace velmi výhodné. Uplatnění lze najít například při „nastavování polohy souřadnicových stolů pro vrtání plošných spojů“. [6] dle Skalického ze str. 82

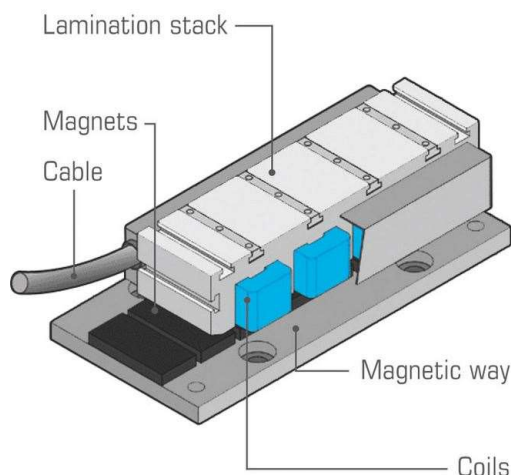


Obr. 7 Krokové motory typu KM fa. KOLLMORGEN [31]

2.3 Lineární motor

Lineární motor je speciální typ bezkartáčového synchronního motoru. Můžeme si ho představit jako běžný servopohon rozvinutý do roviny. Konstrukce motoru je vytvořena tak, aby nepotřebovala pro přenos síly žádný převod (řemen, ozubené kolo). Tato skutečnost umožňuje jednodušší konstrukci okolních dílů stroje.

Můžeme rozlišit dvě hlavní části motoru: pevnou (nazývanou jako „magnetickou dráhu“, připevněnou k ložeti stroje) a pohyblivou (nazývanou jako „kluzák“, připevněnou k pohybujícím se saním/stolu, aj.). Zdvih se odvíjí od počtu segmentů (magnetů) pevné části motoru.



Obr. 8 Princip lineárního motoru (překlad: Lamination stack - kluzák, Magnets – magnety, Cable – přívodní kabel, Magnetic way – magnetická dráha) [8]

„Posuvovou sílu vyvozují přímo působením elektromagnetických sil na suport stroje.“
[1] V případě, je-li nezbytné působit větší silou, dojde jednoduše k umístění dalšího motoru vedle původního.

Největšími přednostmi, které lineární motory nabízí, je vysoká polohovatelná opakovatelnost a vysoká dynamika pohybu. Je umožněno dosáhnout zrychlení až 5G a pohybovat se rychlostí až 10 m/s. Užití tohoto druhu motoru je tedy význačné především pro vysokorychlostní obráběcí stroje. [7] Použití lineárního motoru pro náhon dané osy má však i svá úskalí. Největším je především vznik tepla, které se v důsledku umístění lineárního motoru snadněji roznáší do jednotlivých os stroje. Oproti jiným druhům náhonu musí být mimo jiné zajištěna lepší regulační smyčka a kvalitnější odměřování. [1] [8] [9]



Obr. 9 Lineární motor typu LMS fa. ETEL [8]

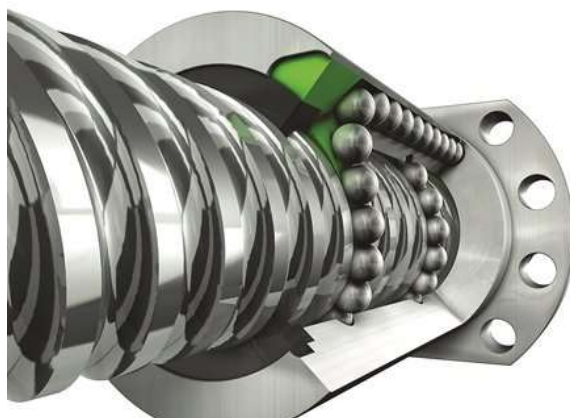
3 Způsoby posuvu lineární posuvové soustavy

Posuvové soustavy jsou vystaveny vysokým nárokům na tuhost, přesnost, přijatelnou dynamiku, kinematiku a plynulou regulaci. Těmto požadavkům vyhovují níže uvedené druhy posuvu. [3]

3.1 Kuličkový šroub a matice

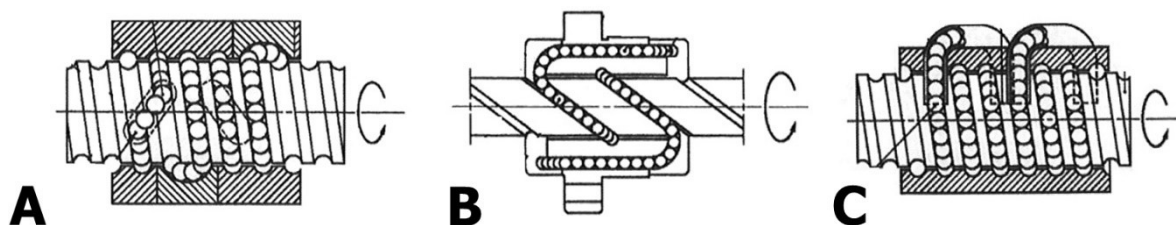
Kuličkový šroub je prvek vyznačující se vysokou účinností, tuhostí, přesností a trvanlivostí. Umožňuje převod rotačního pohybu na pohyb přímočarý. Od standardního trapézového šroubu se podstatně liší svojí vyšší účinností a nižším potřebným momentem umožňujícím pohyb (hodnota účinnosti KŠM je 90 % na rozdíl od šroubu trapézového s účinností 48 %). V důsledku toho má výrazně nižší nároky na produkovanou energii pohonu. [10]

Z důvodu snížení opotřebení závitu šroubu, vymezení vůle a zvýšení účinnosti obíhají mezi šroubem a maticí kuličky (obr. 10). „Šroub a matice jsou ocelové, povrchy závitů kalené a broušené. Závitů jsou vyrobeny s velkou přesností (dovolená úchylka stoupání např. 0,002 mm na 100 mm).“ [3]



Obr. 10 Znáznornění oběhu kuliček mezi kuličkovým šroubem a maticí [32]

Pohyb kuliček mezi šroubem a maticí je dle velikosti zatížení realizován třemi způsoby. Pro nižší zatížení, nebo malá stoupání je užito deflektoru (Obr. 11 A). Při středním zatížení, nebo velkém stoupání je užito převáděcího kanálu (Obr. 11 B). V případě velkého zatížení a běžného stoupání je užito převáděcích trubek (Obr. 11 C). [3]



Obr. 11 Převádění kuliček v KŠM

A – deflektor, B – převáděcí kanál, C – převáděcí trubky [3]

Technické parametry kuličkového šroubu a matice (KŠM) lze rozdělit do několika skupin:

- Geometrické parametry (jmenovitý průměr a stoupání závitu) - „Na rozsahu těchto dvou parametrů závisí axiální zatížení šroubu a s ním spjatá vzpěrná tuhost.“ [11] Velikost jmenovitého průměru má mimo jiné také vliv na maximální otáčky šroubu.
- Kinematický parametr (otáčkový faktor) - Velikost tohoto faktoru je závislá především na převodu kuliček. „Pro vysoké otáčkové faktory je nutné, aby byly dráhy kuliček v maticích a převodnicích co nejplynulejší a přechody navazovaly co možná nejpresněji.“ [11]
- Silové parametry (statická a dynamická únosnost) - Hodnota těchto únosností (tuhostí) se odvíjí nejen od charakteristik daného šroubu a matice (průměr, délka, stoupání, aj.), ale také na typu uložení KŠM a montáži (předepnuté/nepředepnuté uložení).
- Parametr účinnosti (účinnost) - „Je ovlivněna zejména součinitelem tření mezi kuličkou, maticí a hřídelí.“ [11] Platí, že čím větší je úhel stoupání závitu, tím větší je účinnost. Důkazem, že KŠM mají výrazně větší účinnost, než trapézový šroub je Obr. 12

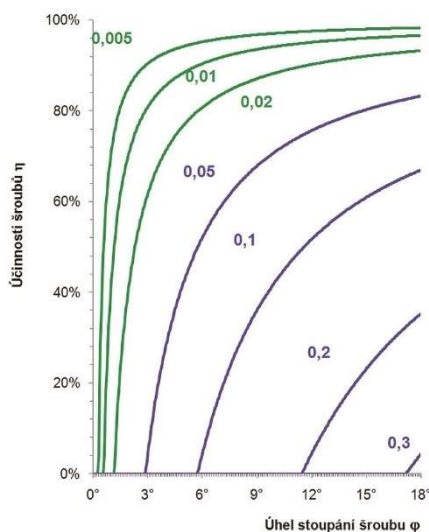
KŠM je možno aplikovat ve třech provedeních:

- Provedení A - šroub se otáčí a matice stojí (poháněn je šroub)
- Provedení B - šroub stojí a matice se otáčí (poháněna je matice)
- Provedení A+B - kombinace provedení A a B, kdy je poháněn šroub i matice [3]

Podle požadované tuhosti pohybového mechanismu můžeme rozlišit dva druhy uložení KŠM:

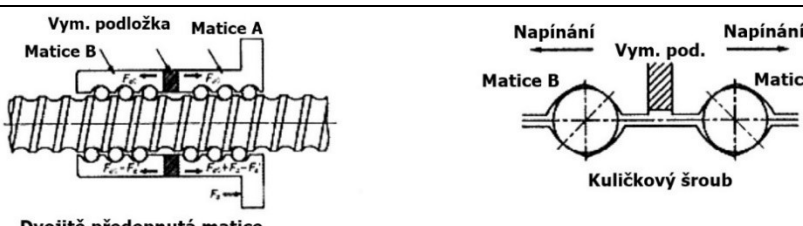
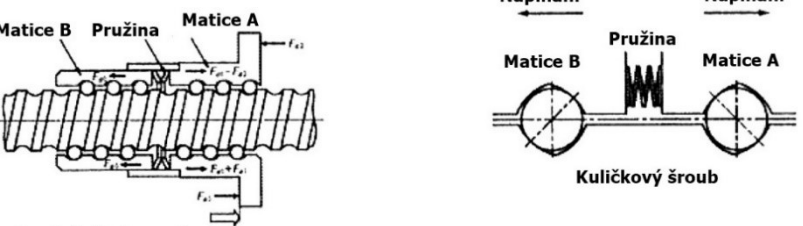



- Jednostranné axiální uložení - během zdvihu dochází k poklesu tuhosti mechanismu
- Oboustranné axiální uložení - během zdvihu je dosaženo vyšší tuhosti mechanismu

Při oboustranném axiálním uložení, je však třeba brát ohled na dilatace, vznikající za provozu v důsledku oteplování, vlivem tření mechanismu KŠM. „V takových případech lze použít způsob, že se ve „studeném“ stavu šroub předepne na tah – během provozu (ohřívání) se nejprve zruší předepnutí na tah a dalším ohříváním na provozní teplotu vznikne axiální tlakové předepnutí.“ [1] dle Marka ze str. 216. Řešením je tedy předpnutí, neboť přepnutím KŠM, dojde k vymezení axiální a radiální vůle. [1]

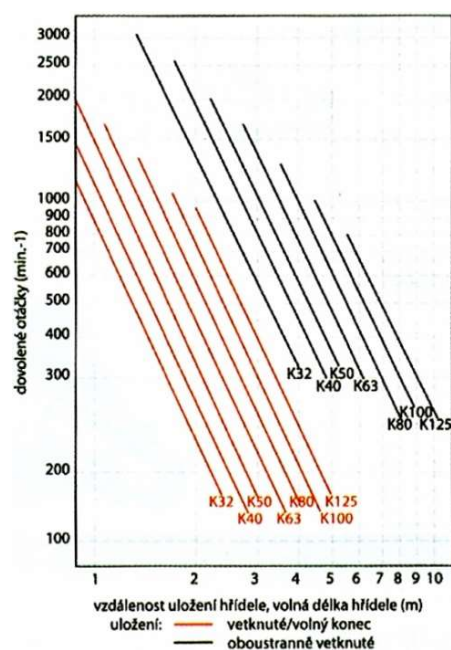


Obr. 12 Průběh účinnosti KŠM (zelené křivky) a průběh účinnosti trapézových kluzných šroubů (fialové křivky) při rotaci šroubu [11]

Tabulka 1 Možnosti vymezení vůle mezi maticí a šroubem [3]

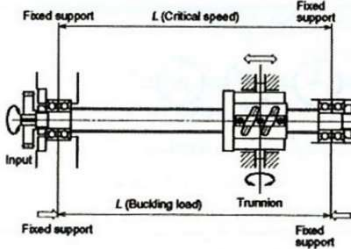
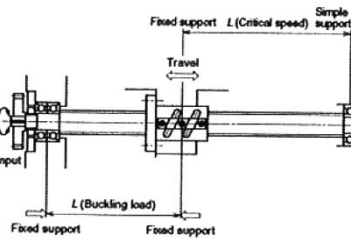
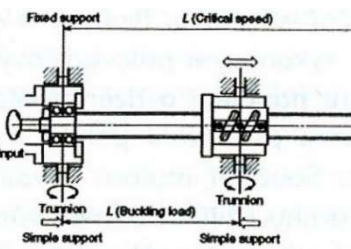
Způsob předepnutí	Schématické zobrazení
Vymezovací podložka	 <p>Dvojitě předepnutá matice</p>
Talířová pružina	 <p>Dvojitě předepnutá matice</p>
Diference ve stoupání	 <p>Kuličkový šroub</p>
Volba kuliček	 <p>Kuličkový šroub</p>
Dělená matice	

Volba uložení KŠM je podstatná nejen kvůli parametru tuhosti pohybového mechanismu. Způsob uložení je totiž také výchozím parametrem pro maximální dovolené otáčky kuličkového šroubu. Překročení těchto otáček by vedlo k nežádoucímu rozkmitání šroubu. [1]



Obr. 13 Dovolené otáčky KŠ v závislosti na způsobu uložení [1]

Tabulka 2 Způsoby uložení KŠM [3]

Způsob uložení KŠ	Schématické zobrazení
Oba konce uloženy axiálně	
Levý konec KŠ uložen axiálně, pravý konec KŠ uložený radiálně	
Levý konec KŠ uložen axiálně, pravý konec KŠ uložený volně	

3.2 Pastorek a hřeben

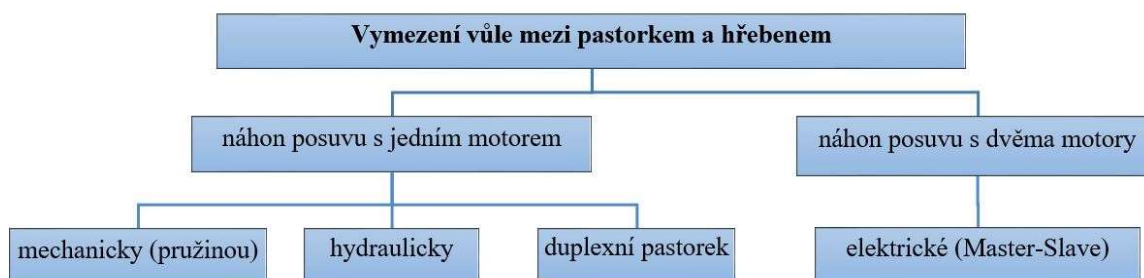
Pastorek a hřeben je alternativním řešením ke kuličkovým šroubům, při převodu točivého momentu na lineární pohyb. Pastorky a hřebeny jsou vyráběny jak s přímými, tak s šikmými zuby. Hřebeny se vyrábějí v různých délkách a jsou vyráběny tak, aby bylo umožněno je za sebe segmentově skládat. Díky tomuto faktu, je umožněn téměř neomezený zdvih. Hřebeny se na rozdíl od pastorků připevňují k nepohyblivému rámu stroje. Mezi pohonnou jednotku a pastorek bývají z důvodu regulace otáček motoru vkládány také převodovky. Činnost převodovky mimo jiné zajišťuje také větší moment a tím i větší posuvovou sílu. Spojení hřebenu a pastorku není samosvorné. Z bezpečnostních důvodů (pro případ havarijního stavu – výpadek proudu), bývá tedy k pohonu pastorku a převodovce instalována také brzda. [1] [12]



Obr. 14 Pastorek s planetovou převodovkou RP+ od fa. Wittenstein Alpha a hřeben s přímými zuby [33]

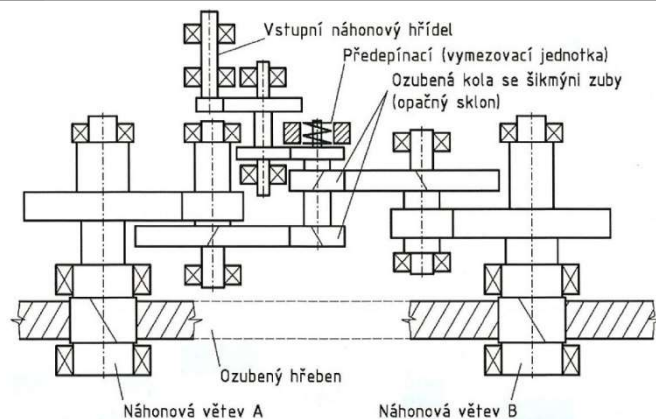
Přesnost polohování, které je pastorek a hřeben schopen dosáhnout záleží na přesnosti výroby hřebene, pastorku, převodovky a vůlemi mezi těmito komponenty. Na trhu jsou běžně k dostání v třídách přesnosti od IT10 až do IT5. [13]

Možné způsoby vymezení vůle mezi pastorkem a hřebenem jsou zřejmé z Obr. 15



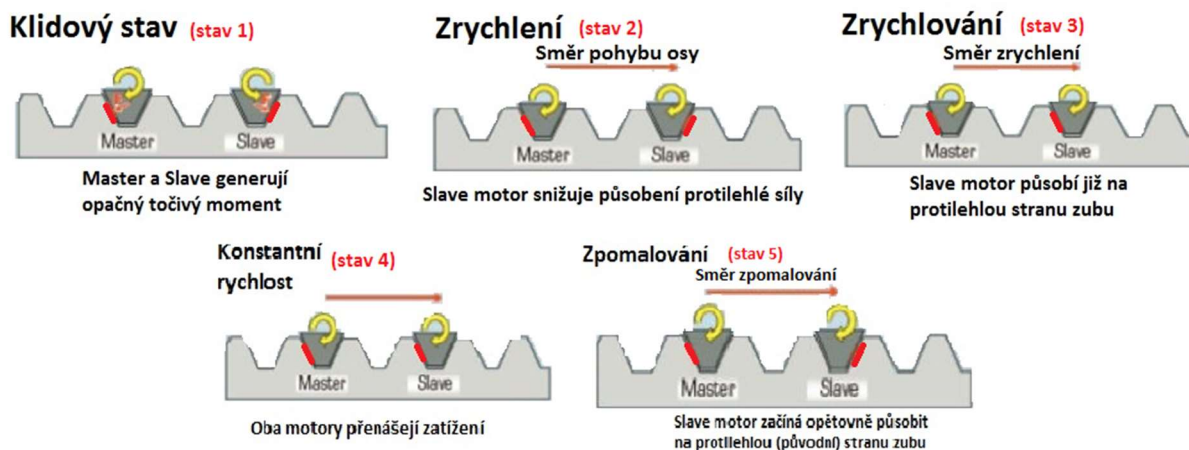
Obr. 15 Způsoby vymezení vůle mezi pastorkem a hřebenem [1]

Mechanicky lze vymezit vůli dle Obr. 16. „Princip řešení je v tom, že posuvná hřídel s dvojicí pastorků s opačným sklonem šikmých zubů je trvale dotlačována do záběru pružinou (nebo hydraulicky), a tím je vymezována vůle v obou větvích pohonu A a B.“ [3] dle Marka ze str. 98.



Obr. 16 Mechanické vymezení vůle mezi pastorkem a hřebem [12]

Modernějším způsobem vymezení vůle je však využití řídicího systému – elektronického předepnutí (Master Slave). Metoda spočívá v pohánění dvou pastorků, přes vložené planetové převodovky dvěma motory v režimu Master Slave. Princip režimu Master Slave je popsán v závislosti na pohybovém stavu na Obr. 17.



Obr. 17 Průběh děje vymezení vůle metodou Master-Slave [34]



Obr. 18 Ukázka metody Master Slave v aplikaci pro rotační pohyb fa. Redex [35]

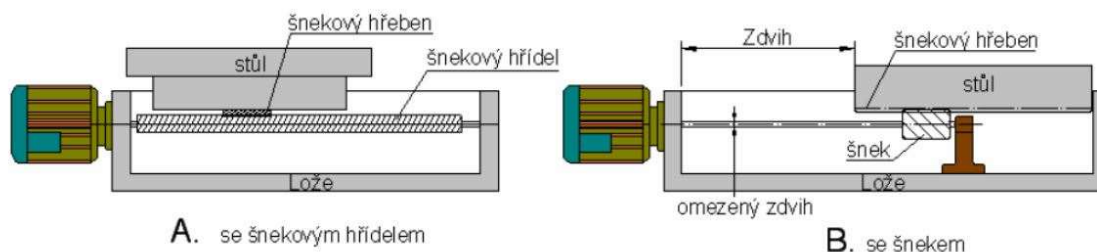
3.3 Šnek a šnekový hřeben

Posuv pomocí šneku a šnekového hřebenu lze uplatnit ve dvou variantách

- Varianta A: Hřídel se šnekovými závity po celé délce zdvihové části, po které se pohybuje šnekový hřeben s omezenou délkou, připevněný ke stolu. Tato varianta má nevýhodu ve zkrucování hřídelové části a z toho důvodu je méně užívaná
- Varianta B: Hřídel se šnekovými závity jen na části hřídele a šnekovým hřebenem po celé délce stolu. Při této variantě šnekový hřeben „proplouvá“ závity v hřebeni a tím dochází k pohybu stolu

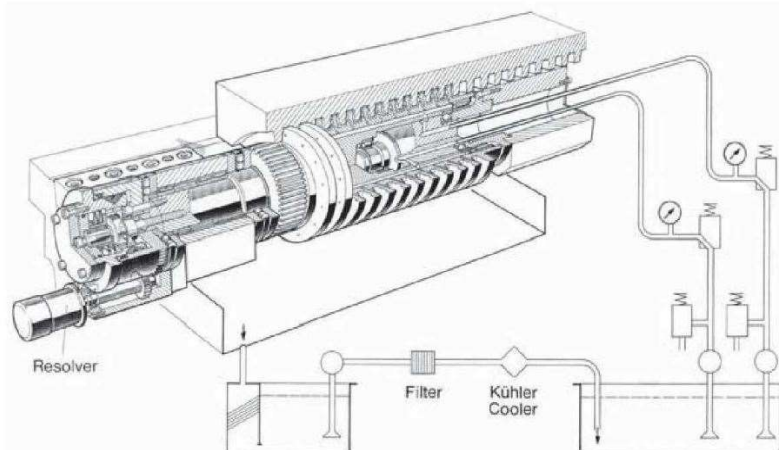
Takto realizovaného posuvu se užívá především u těžších obráběcích strojů (portálové frézky). Kvůli snížení opotřebení závitu je šnek, popř. šneková hřídel, částečně ponořen do oleje, který místo záběru maže a tím prodlužuje životnost jednotlivých pohybových komponent.

Zvláštním případem užití šnekového převodu je hydrostatický šnekový hřeben.



Obr. 19 Znázornění provedení varianty A a B [36]

Základní komponentou je šneková tyč s olejovými kapsami, do kterých je pod tlakem přiváděn olej. Tyto kapsy jsou dotlačeny na boční hrany ozubeného hřebene a jsou mazány pouze při záběru se šnekem. [1] [12]



Obr. 20 Hydrostatický šnek a šnekový hřeben s vyobrazeným odměřováním polohy - Resolverem, sběrným místem oleje a tlakovým obvodem mazání [36]

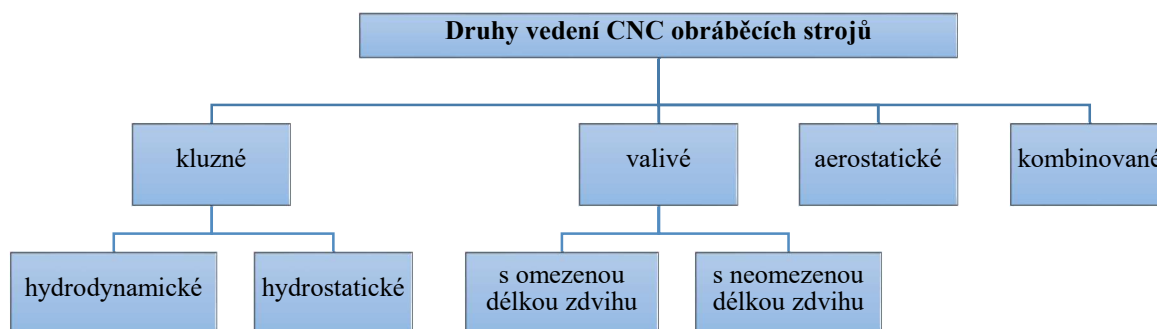
Olej z kapes následně stéká přes šnek do sběrného místa pod šnekovým soukolím. „Pohon šneku je proveden ozubením od ozubeného pastorku na hnací hřídeli spojené přímo s náhonovým motorem.“ [1] dle Marka ze str. 230.

4 Druhy vedení CNC obráběcích strojů

Vedení je soustava „vodících“ ploch, na kterých se stýká pohyblivá část (například stůl, saně) s nepohyblivou částí (například lože). Tyto plochy musí zaručit pohyb po geometricky přesné dráze. Na vedení jsou obecně kladeny tyto požadavky

- Vysoká statická a dynamická tuhost
- Vedení musí být vyrobeno s takovou přesností, aby odchylky dráhy pohybu od ideálního tvaru dráhy byly v mezích požadované přesnosti konstruovaného stroje
- Přesnost vedení dosažená při výrobě má být co nejdéle zachována. Z toho důvodu je nezbytná vhodná volba materiálu ploch, případně jeho tepelného zpracování
- Z důvodu udržení přesnosti a správné funkce vedení je nutná možnost případného vymezení vůle, která vznikla opotřebením při provozu stroje
- Výborná jakost povrchu, která bude mít za následek snížení koeficientu tření. Čím nižšího koeficientu tření dosáhneme, tím menší bude odpor při pohybu a opotřebením vodících ploch
- Vedení je nezbytné chránit před poškozením, případně před předčasným opotřebením v důsledku vnikajícího prachu, třísek a jiných nečistot
- Volba vhodného maziva, snižujícího opotřebením a ztráty pohybu
- Tvar vedení musí zaručovat pro pohybující se prvek jeden stupeň volnosti a zároveň vhodně zachycovat přenášené síly z jedné komponenty stroje na druhou
- Tvar vedení musí být zároveň co nejsnadněji výrobitelný. Čím méně bude mít profil vedení ploch, tím snadněji splní všechny výše uvedené požadavky

Z hlediska tření mezi styčnými plochami rozlišujeme několik druhů vedení. Jejich rozdělení je graficky znázorněno v Obr. 21.



Obr. 21 Druhy vedení lineárních posuvových soustav [3]

4.1 Kluzné

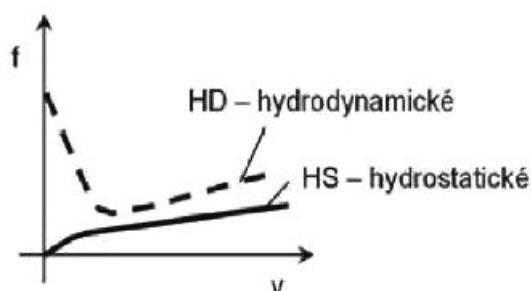
Kluzný typ vedení můžeme rozlišit na dva typy

- Hydrodynamické
- Hydrostatické

Parametrem na základě, kterého se kluzné vedení takto rozlišuje je třecí poměr, který danému typu dominuje. [1] [12] [14]

4.1.1. Hydrodynamické

Tento druh vedení bývá v praxi často označován pouze jako vedení kluzné. Svůj oficiální název má však hydrodynamické vedení díky skutečnosti, že olej přiváděný mezi pohyblivé části vedení vytváří mazací film pouze během pohybu. Při pohybu totiž vzniknou podmínky tzv. „hydrodynamického mazání“. Charakteristickým jevem pro tento druh vedení je Stribeckův efekt popisující závislost třecí síly na posuvové rychlosti, tedy stabilitu pohybu. K nestabilnímu pohybu dochází u hydrodynamického vedení tehdy, když se saně z klidového stavu dostávají do stavu pohybového. Aby byly saně uvedeny do pohybu, musí nejprve překonat odpor tření za klidu. Jakmile se saně uvedou do pohybu, součinitel tření je roven součiniteli tření v pohybu. Tento jev je znám také jako „Stick-slip“ a může se projevit buď trhavým pohybem, nebo dokonce znemožněním přesného nastavení nástroje vůči obrobku. [1] [14] [15]



Obr. 22 Zobrazení závislosti součinitele tření na rychlosti s grafickým srovnáním výsledků mezi hydrodynamickým a hydrostatickým vedením [3]

Tyto nežádoucí jevy lze však minimalizovat. Řešením může být buď zvyšování tuhosti, nebo snižování rozdílu mezi třením za klidu a za pohybu. Snižít rozdíl mezi třením se docílí pomocí speciálních aditivovaných mazacích olejů, nebo obložení jedné z protilehlých vodících ploch umělými hmotami (Turcit, Biplast, Gamapest, apod.). [1]

Počáteční přesnosti vedení dosáhneme pomocí vhodně zvolené technologie obrábění. Zachování této přesnosti i během provozu stroje je (při opomenutí mazání a ochrany vodících ploch) dáno vhodnou volbou materiálu. „Odolnost vodících ploch proti opotřebení závisí na četných činitelích, zejména na chemickém složení, fyzikálně-mechanických vlastnostech materiálu vedení a materiálu sdrúžených ploch, na drsnosti povrchu kluzných ploch.“ [12] dle Borského ze str. 162. Podle dosavadního zkoumání je známo, že tvrdost materiálu nemusí být zárukou vyšší odolnosti proti opotřebení. Jsou-li totiž obě plochy vedení stejně tvrdé, mohou se při menších rychlostech pohybu za vyšších tlaků mnohem snáze zadírat. „Někdy se tvrdý materiál odírá rychleji než měkký, neboť velmi značně záleží na stejnorodosti struktury materiálu a tvaru krystalů.“ [12] dle Borského ze str. 163. Z těchto důvodů je nejvhodnější kombinace jedné plochy s vyšší tvrdostí a druhé plochy s tvrdostí nižší. Vzhledem k tomu, že tvrdý materiál se opotřebovává pomaleji, volí se vždy pro důležitější a delší vodící plochy. Vodící plochy bývají vytvářeny z těchto materiálů

- Šedá litina-Využívá se jakostní šedá litina. Za účelem zvýšení modulu pružnosti je výhodné použití očkované (modifikované) litiny. Delší vodící plochy se obkládají chladítky, čímž dojde ke zvýšení jejich tvrdosti o 20 HB.
- Kalená šedá litina-Z důvodu dosažení vyšší tvrdosti (48-53 HRC) se povrch litiny může kalit do hloubky 2 až 3 mm.
- Kalená ocel-Nabízí nejvyšší odolnost a tvrdost (60 HRC). Vedení z kalené oceli se vyrábí v lištách, které se k ložeti upevní pomocí přilepení, nebo přišroubování.

- Umělé hmoty-Aplikací umělých hmot nezískáme pouze výborné třecí vlastnosti snižující tření mezi protilehlými plochami vedení, jak již bylo zmíněno výše. Jejich užitím získáme také nemožnost zadření (při nedostatečném mazání) a velmi nepatrného opotřebování sdružené části z kovu. Na úkor toho mají nižší odolnost vůči opotřebení. [1] [12]

Na Obr. 23 jsou tyto materiály souhrnně uvedeny s některými jejich základními vlastnostmi a doporučenou oblastí využití.

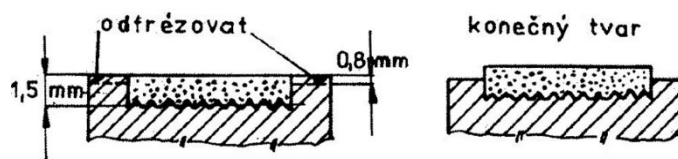
Materiál vodících ploch		Největší dov. měrný tlak p [MPa]	Součinitel tření f	Oblast využití
kratší plochy – stůl	delší plochy – lože			
šedá litina	šedá litina (+20 HB)	2 až 3	0,1 ... 0,15	stoly a suporty soustruhů, frézek apod.
		0,15 až 0,8	0,06 ... 0,1	stoly hoblovek (nižší hodnota p pro velké rychlosti)
		0,005 až 0,1	0,06 ... 0,1	stoly brusek apod.
	litina povrchově kalená (48 – 53 HRC) ocelové kalené lišty (60 – 63 HRC)	2,5 ... 3, 5	0,1 ... 0,15	stoly a suporty os s vyšší odolností proti opotřebení
umělá hmota	šedá litina	0,35 ... 0,8	0,02 ... 0,06	stoly a suporty os s menším třením

Obr. 23 Přehled materiálů užívaných pro vodící plochy [1]

Umělé hmoty se aplikují na kovové části obráběcích strojů v\e formě:

- Tuhé - Tenké desky (nejznámější Turcite o tloušťce 2 - 3,3 mm a $f_0 = 0,06$), připevňující se ke kovové části stroje pomocí přišroubování, přinýtování nebo přilepení.
- Kašovitě - Nanesení kašovitě směsi (1,5 mm) do prostoru v dílci. Po vytuhnutí je nezbytné obvodové frézování (viz. Obr. 24) kovového materiálu kvůli zajištění správné funkce.
- Tekuté – Odlévání vrstvy (1,5 – 2,5 mm o $f_0 = 0,11$) do předem vymezeného a vytěsněného prostoru mezi sdruženými částmi vedení (tvrdnutí cca 24 hodin).

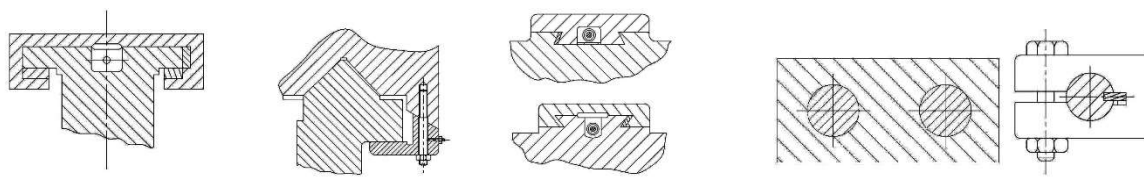
Oprava opotřeбенé plochy je velmi jednoduchá a výrobně finančně nenáročná, neboť spočívá v odstranění případné zbytkové vrstvy umělé hmoty a jejím opětovném aplikování na danou komponentu. [1] [12]



Obr. 24 Princip aplikování umělé kašovitě směsi [12]

Vedení bývá konstruováno v několika tvarových typech:

- Ploché
- Prizmatické
- Rybinové
- Kruhové (válcové)



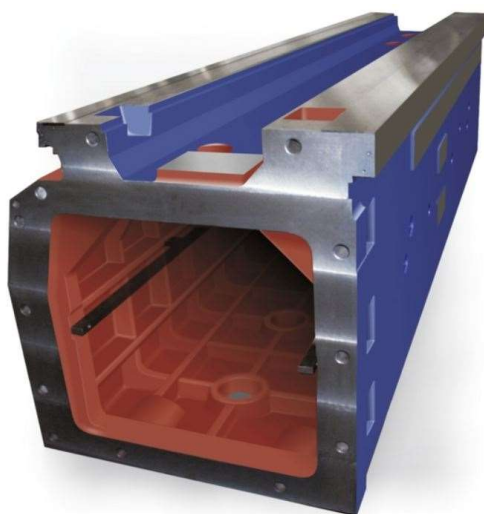
Obr. 25 Základní tvarová provedení
Zleva: ploché, prizmatické, rybinové, kruhové (válcové) [14]

Ploché vedení je význačné svojí vysokou účinností. Je schopno zachytit velké silové momenty a užívá se tedy u těžkých strojů. Hlavní tlak zachycuje horní plocha, vedlejší tlaky jsou zachycovány svislými plochami. Klopné momenty zachytí spodní plochy, pomocí připevněných lišt.

Prizmatické vedení je charakteristické vrcholovým úhlem v rozmezí 70-120° a snadným mazáním. Spodní vedení je provedeno opět lištami. Aplikace prizmatického vedení je soustředěna především pro suporty soustruhů, nebo vedení stolů hoblovek.

Rybinové vedení umožňuje přenášení vodorovných i svislých zatížení bez použití vymezovacích lišt. Podle druhu namáhání se využívá dvou základních provedení: vnitřního a vnějšího. Výhodou oproti jiným tvarovým provedením je nižší výška při zachování stejné tuhosti. Nevýhodou je však vyšší koeficient tření. [14]

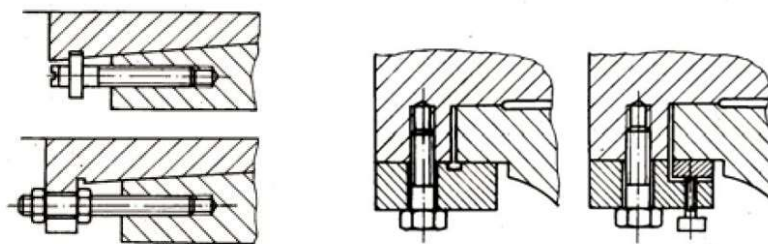
Kruhové (válcové) vedení je charakteristické nezbytným omezením dalšího stupně volnosti (protočení), čímž bývá dosaženo perem, nebo zdvojením vedení. Válcové vedení není proto vhodné pro vedení suportů, stolů, apod. Je však velmi vhodné pro vedení pinoly vřeten frézek a vrtaček, nebo také pro vedení pinoly koníků u soustruhů.



Obr. 26 Užití plochého typu kluzného vedení pro stojan [37]

Vymezení vůle u hydrodynamického vedení lze zajistit pomocí:

- Klínových lišt (pro vymezení vůle ve vodorovném směru)
- Přítlačných lišt (pro vymezení vůle ve vertikálním směru) [12] [14]



Obr. 27 Vymezení vůle vedení pomocí stavěcí klínové lišty (vlevo) a přítlačné dolní lišty (vpravo) [38]

4.1.2. Hydrostatické

Hydrostatické vedení je založeno na principu tzv. kapalinového tření, kterého je docíleno dodáváním oleje pod tlakem mezi jednotlivé vodící plochy. Jak již bylo naznačeno na Obr. 22, hydrostatické vedení se vyznačuje velmi nízkou hodnotou součinitele tření (0,000005) při poměrně velkém rozsahu rychlostí.

Jedna z protilehlých stran vedení „...se skládá z několika, nejméně tří ložiskových kapes, které jsou upevněny na jedné z vodících ploch a druhá plocha je zcela hladká, tak jako u normálního kluzného vedení.“ [12] dle Borského ze str. 167. U protilehlých ploch vedení musí být zajištěna co největší rovnoběžnost.

Ložiskové kapsy dodávají do systému olej hnaný čerpadlem. Rozteč mezi ložiskovými kapsami se pohybuje v rozmezí 0,5-1,5m. Jejich počet je dán rovnoměrností zatížení. Vysokou tuhost při rovnoměrném zatížení nám zajistí i malý počet kapes, zatímco při nerovnoměrném zatížení v čase je vhodné volit větší počet ložiskových kapes. Každá ložisková kapsa je vybavena regulačním mechanismem zodpovědným za dodávku oleje pod pracovním tlakem. Pracovní tlak se mění v závislosti na zatížení. Stoupne-li zatížení tlak se zvýší a naopak. Minimální výška olejové vrstvy se v aplikaci pro malé a střední stroje pohybuje v rozmezí 0,015-0,025 mm a pro těžké stroje v rozmezí 0,04-0,06 mm. Vztah mezi tloušťkou olejové vrstvy, vhodnými rozměry kapes, tlakem a průtokem udává Hagenův-Poiseuillův zákon (Obr. 28) [1] [12]

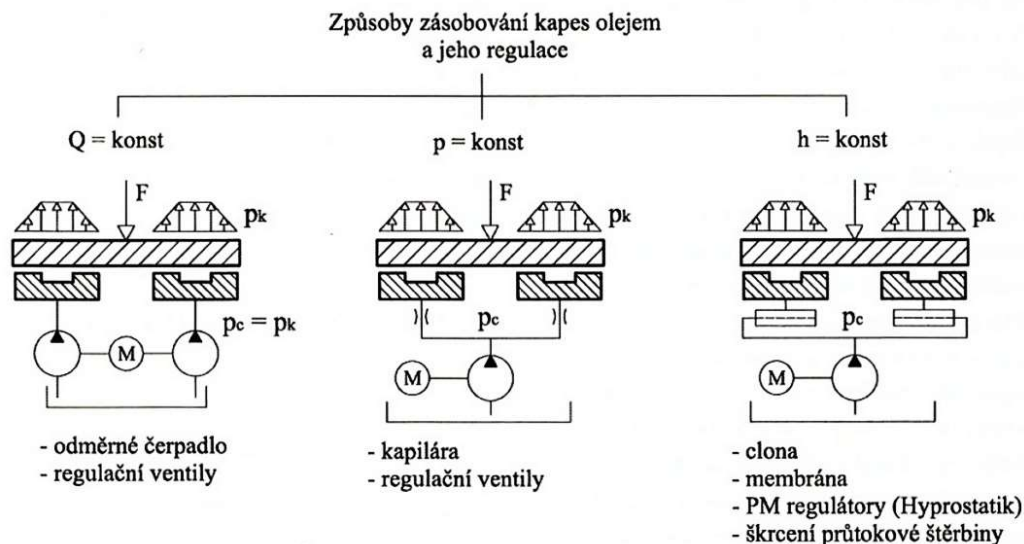
$$Q = \frac{\Delta p \cdot b \cdot h^3}{12\eta \cdot L} [1]$$

kde	Q	...	průtok	[L.s ⁻¹]
	Δp	...	tlakový spád	[Pa]
	b	...	šířka kapsy	[m]
	h	...	výška olejové vrstvy	[m]
	η	...	dynamická viskozita	[Pa.s]
	L	...	délka kapsy	[m]
	F	...	zatěžující síla	[N]

Obr. 28 Hagenův-Poiseuillův vztah pro hydrostatické vedení [1]

Rozlišujeme tři základní provedení zásobování ložiskových kapes olejem:

- Odměrnými čerpadly (dávkování konstantního množství oleje do každé kapsy)
- Kapilárami (udržování konstantního tlaku v obvodu)
- Clonami/Membránami/PM regulátory (udržování konstantní výšky vrstvy oleje)



Obr. 29 Způsoby zásobování kapes olejem [1]

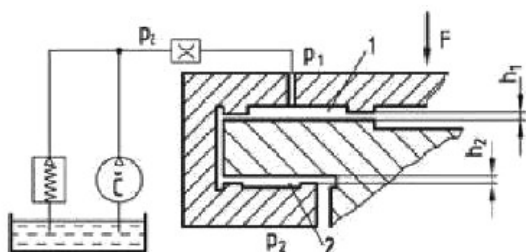
Nejjednodušším, nejlevějším, avšak nejméně tuhým provedením zásobování oleje je pomocí jednoho odměrného čerpadla pro celý systém a škrcením oleje na vtok do každé kapsy. Výrazně lepších výsledků dosáhneme systémem odměrného čerpadla pro každou kapsu. Nejvyšší tuhost za cenu nejvyšší ceny dosáhneme pomocí užití systému stavitelného škrcení v závislosti na tlaku, pomocí aplikace clon, membrán, nebo regulátorů. [1] [12]



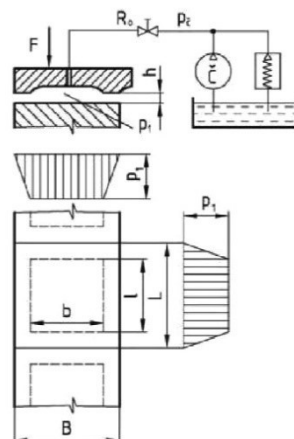
Obr. 30 Hydrostatické vedení v aplikaci s kluznou plochou [39]

Rozlišujeme dvě základní provedení hydrostatického vedení:

- Uzavřené (Obr. 31)
- Otevřené (Obr.32)



Obr. 31 Uzavřené hydrostatické vedení [3]



Obr. 32 Otevřené hydrostatické vedení [3]

Nejvýraznějším principiálním rozdílem mezi těmito dvěma provedeními je skutečnost, že uzavřené vedení je na rozdíl od vedení hydrostatického mazáno z obou stran. Otevřená hydrostatická vedení je doporučeno používat pro velké zátěže, které se v průběhu času výrazně nemění. Aplikovat lze tedy především u stojanů těžkých strojů. Uzavřená hydrostatická vedení jsou naopak výhodnější pro nerovnoměrná zatížení, neboť díky mazání z obou stran se výrazněji tlumí působení klopných momentů. [1]



Obr. 33 Řešení hydrostatického vedení pomocí kolejnice a vozíku fa. Schaeffler Technologies [27]

4.2 Valivé

Valivé vedení se vyznačuje výbornou plynulostí posuvového pohybu. Tato vlastnost je způsobena nepatrným rozdílem mezi součinitelem tření za klidu a za pohybu. Nevzniká tedy nežádoucí Stribeckův efekt popsán v kapitole kluzného vedení a lze tedy dosáhnout výrazně menšího rozptylu velikosti dráhy při najíždění na požadovanou souřadnici. Přesnost pohybu je zajištěna jak při velkých, tak i při malých posuvových rychlostech. [1]

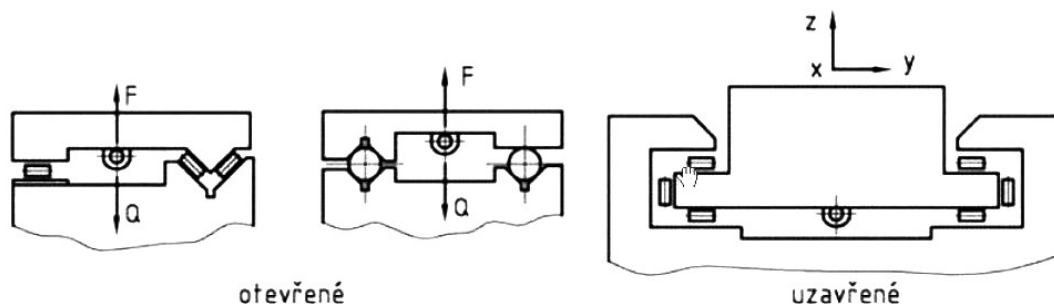
Mezi další výhody valivého vedení lze uvést:

- Minimální opotřebení – dlouhá životnost (opotřebení valivých drah a valivých tělísek je velmi nízké)
- Možnost předepnutí vedení během montáže (vymezení vůle, zvýšení tuhosti)
- Snadná údržba

Negativními parametry tohoto typu vedení je však horší schopnost útlumu chvění při obrábění, větší zástavbový rozměr než jiné typy vedení, vyšší nároky na přesnost výroby a tepelného zpracování jednotlivých komponent vedení, což má za následek vyšší pořizovací náklady. [12] [16]

Charakteristické typy provedení valivého vedení jsou:

- Otevřené – schopné zachytit jen zatížení působící tlakem (pro aplikace bez předepnutí)
- Uzavřené – schopné zachytit také klopné momenty (pro aplikace s předpnutím)



Obr. 34 Náčrty otevřeného a uzavřeného typu valivého vedení [3]

Dle tvaru valivých elementů rozlišujeme valivá vedení na:

- Kuličková
- Válečková
- Jehlová

Nejčastěji užívaná valivá tělesa vedení jsou kuličky a válečky. Kuličky jsou vhodnější pro rychloposuvové aplikace. Z důvodu bodového styku a zabránění vmačkávání kuliček do vedení je vhodné užit tenkostěnných kalených listů k obložení vedení. Toto řešení je mnohem levnější alternativou výroby celého profilu z kvalitní legované oceli. Kuličky mají ve srovnání s válečky menší únosnost, ale na úkor toho jsou méně citlivé na přesnost obrobení dosedací plochy a mají nižší pořizovací náklady. Válečky poskytují větší stykovou plochu, tudíž lepší únosnost, tuhost a životnost. Vyžadují si však vyšší přesnost obrobení dosedací plochy a také vyšší pořizovací náklady. Válečky se užívají často pro jednostranná prizmatická vedení (ukázkou může být pravá vodící plocha na prvním obrázku zleva na Obr. 34). Při tomto použití je nízká tuhost a není možné předepnutí, jak bylo již zmíněno v této kapitole výše. Z tohoto

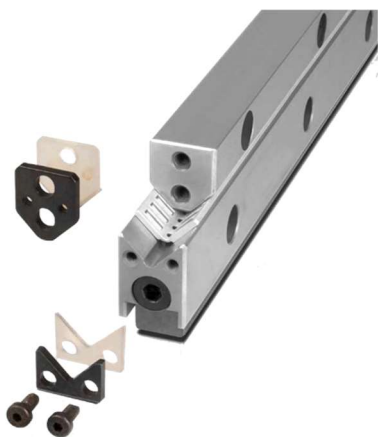
důvodu se užívá vedení se dvěma skloněnými drahami. Tohle řešení je finančně nejnákladnější, ale funkčně nejvýhodnější. Vedení je předepnuto ve vertikálním i horizontálním směru a zatížení je tedy maximálně absorbováno. [12] [14]

Dle délky zdvihu rozlišujeme vedení:

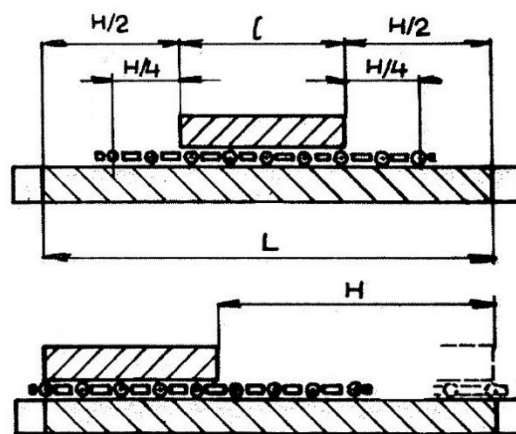
- s omezenou délkou zdvihu
- s neomezenou délkou zdvihu

4.2.1 Vedení s omezenou délkou zdvihu

Charakteristickým znakem tohoto typu vedení je, že zdvih klece s valivými prvky je schopen vykonat pouze polovinu pracovního zdvihu vedení. Vedení může být zkonstruováno jak v otevřené, tak v uzavřené variantě. Nejčastěji užívanými valíciemi elementy jsou především válečky. Jehlové elementy nachází uplatnění při užití prizmatického vedení. [1]



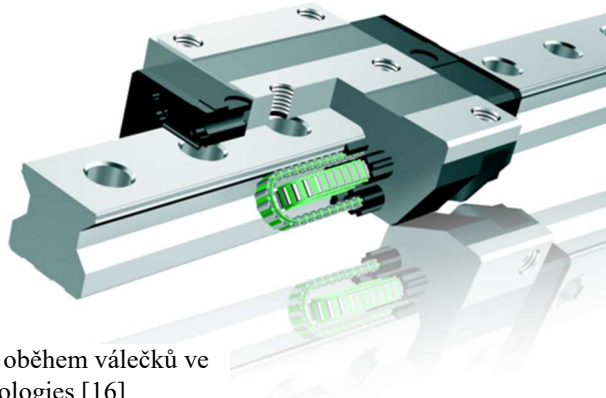
Obr. 36 Válečkové valivé vedení klecové s omezeným zdvihem fa. PUMA MB [40]



Obr. 35 Schématické zobrazení vedení s omezenou délkou zdvihu [12]

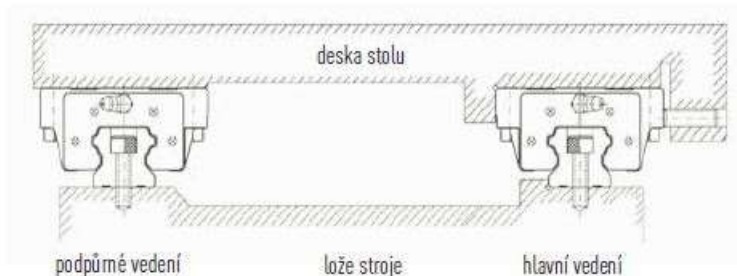
4.2.2 Vedení s neomezenou délkou zdvihu

Základními prvky tohoto typu vedení, označovaným také jako vedení profilové, je kolejnice a po ní pohybující se tzv. valivé hnízdo, označováno také jako blok. Omezujícím parametrem pohybu tohoto bloku, připevněného k posouvané části stroje, je tedy pouze délka kolejnice. Hovoříme proto o tzv. neomezené délce zdvihu. V tělese bloku obíhají při pohybu kuličky, popř. válečky jako je zobrazeno na Obr. 37. [1]

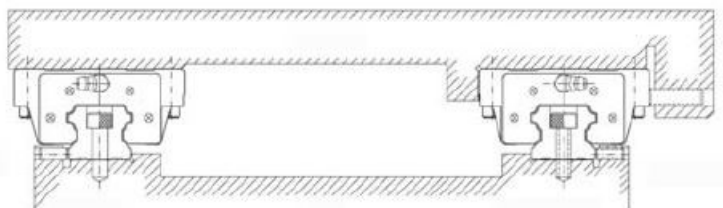


Obr. 37 Kolejnice s valivým hnízdem a vyobrazeným oběhem válečků ve dvou skloněných drahách fa. Schaeffler Technologies [16]

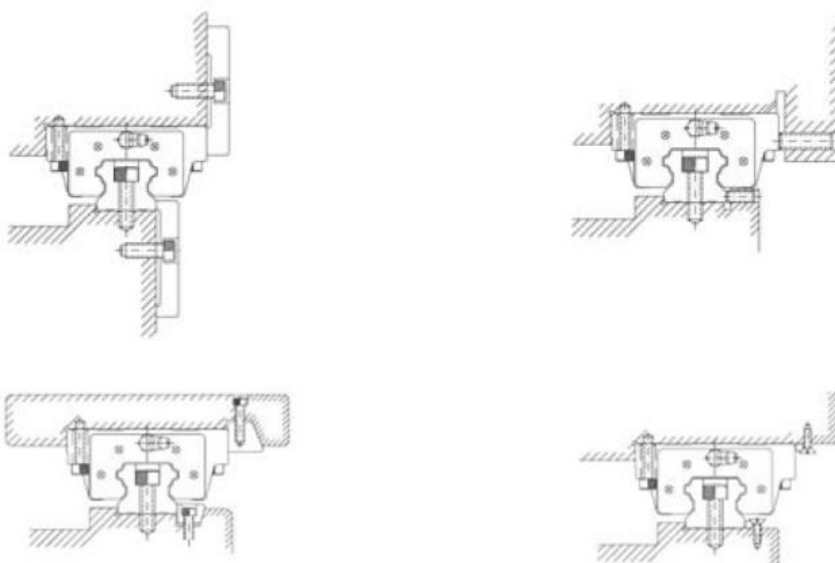
Kolejnice a bloky vyrábějí výrobci (například: Schaeffler Technologies, THK, Schneeberger, HIWIN, aj.) v různých délkových a šířkových velikostech. Volba vhodného rozměru, počtu a druhu valivého elementu, kolejnic a bloků závisí na provozních podmínkách pro které je vedení konstruováno. Pro dosažení co nejvyšší tuhosti, co nejlepšího přenosu zatížení a co nejvyšší přesnosti vedení je třeba věnovat pozornost správně navrženému upevnění vedení ke stroji (opření kolejnice, nebo vozíku o referenční hranu) a montáži. „Pro vymezení vůle a vytvoření předpětí je vždy jeden z dvojice protilehlých valivých bloků podložen dolíčovací podložkou.“ [12] dle Borského ze str. 176 a 177. Přesné dolícování je však náročné, a proto může být výhodnější použití principu stavitelného předpětí vznikajícího pomocí klínové podložky posouváné šroubem. [3] [12]



Obr. 39 Způsob upevnění paralelního vedení s jednou referenční dorazovou hranou pro stroj bez rázů a vibrací doporučený fa. HIWIN [41]



Obr. 38 Způsob upevnění paralelního vedení pro stroj s rázy a vibracemi za použití přitlačných šroubů doporučený fa. HIWIN [41]



Obr. 40 Další způsoby upevnění paralelního vedení pro stroj s rázy a vibracemi za použití přitlačných šroubů a přitlačných klínů doporučený fa. HIWIN [41]

4.3 Aerostatické

Aerostatické (vzduchové) vedení funguje na stejném principu jako vedení hydrostatické s tím rozdílem, že médiem zajišťující tuhost systému není olej, ale vzduch. V porovnání s hydrostatickým vedením je mnohem méně tuhé. Z tohoto důvodu se používá především pro malé, přesné stroje (často měřicí CNC automaty). Podstatnou výhodou tohoto typu vedení je eliminace kontaminace pracovního prostředí únikem média. U strojů pracujících na hydrostatickém vedení není tedy třeba řešit zajištění svodů a ani zpětného okruhu média v obvodu. [1] [3]



Obr. 41 Čtyř-osé měřicí centrum fa. IMTS [42]

4.4 Kombinované

Kombinované vedení spočívá v kombinaci jednotlivých druhů vedení a spojení jejich předností. V praxi se využívají především následující kombinace:

- Kluzně-valivá (na jedné ose i na jednom stroji)
- Valivě-hydrostatická (na jednom stroji)

Kluzně-valivé uzavřené vedení je velmi výhodné pro aplikace, kdy požadujeme utlumení kmitání vzniklé zatížením z řezného procesu (pomocí vrchních a boční lišty) a zároveň nezvýšit zatížení působící na spodní a boční lišty (valivé vymezovací klíny) v důsledku působení klopného momentu. [1]

5 Ochrana vedení

Neodmyslitelnou součástí každého obráběcího stroje by měly být prvky, chránící vodící soustavu. Na první pohled se může zdát, že tyto prvky plní především funkci estetickou, opak je však pravdou. „Pokud by nebyly chráněny funkční části obráběcího stroje, mělo by mechanické působení třísek a kovového prachu (vzniká typicky při obrábění litiny) a účinky chemicky agresivní řezné kapaliny na stroj destruktivní účinky.“ [1] dle Marka ze str. 324.

Tyto destruktivní účinky se projeví postupnou, zhoršující se přesností polohování stroje. V praxi lze tomuto nežádoucímu jevu předcházet několika způsoby.

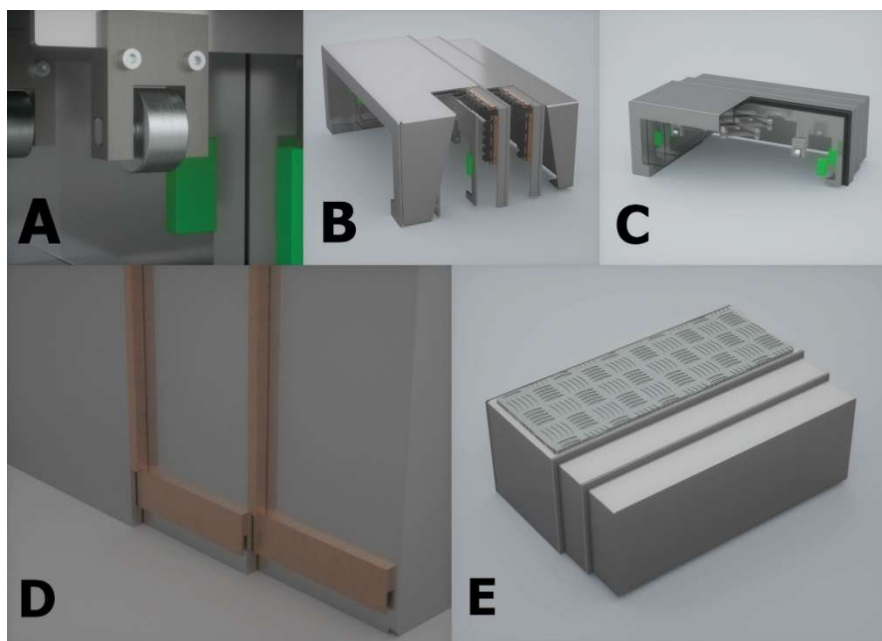
5.1 Teleskopické kryty

Teleskopické krytování je jedním z nejčastěji, avšak ekonomicky nejnáročnějších používaných řešení chránících nejenom samotné vedení, ale i jiné nepostradatelné prvky jednotlivých os obráběcích strojů (odměřovací pravítko, senzory, hadice, aj.). [17] „Tvar krytu obvykle kopíruje prostor, který je vyplněný částmi stroje... který má být chráněn.“ [1] dle Marka ze str. 326. Parametr tvaru ovšem bere na zřetel také směr dopadu třísek a vhodný směr odtoku chladicí emulze pro dané řešení stroje. [1]

S ohledem na velikost, hmotnost, požadovanou posuvovou rychlost, případně pochůznost, se teleskopické kryty vybavují dodatečným příslušenstvím. [18]

Jsou to především:

- vodící prvky (Obr. 42 A), s ohledem na hmotnost a konstrukci
- tlumiče rázu (Obr. 42 B), posuvová rychlosti nad 15 m/min
- pantografický systém (Obr. 42 C), posuvová rychlost 30-60 m/min
- mosazné zámky (Obr. 42 D), pro zabezpečení tuhosti
- protiskluzový plech (Obr. 42 E), umožňující vstup na kryt



Obr. 42 Ukázka dodatečného příslušenství teleskopických krytů fa. HENNLICH [18]

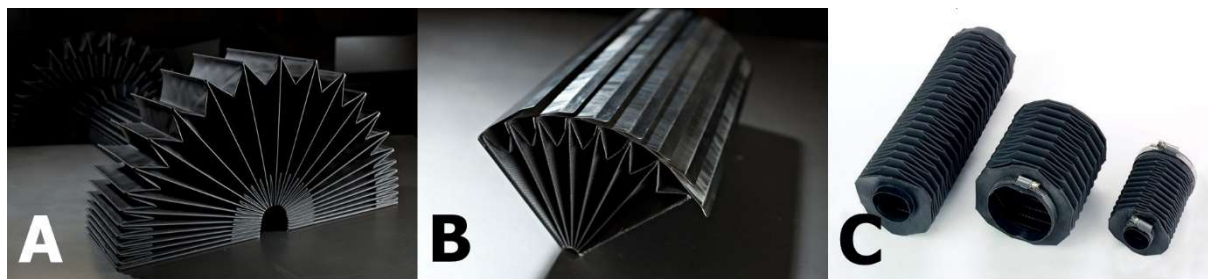


Obr. 43 Aplikace teleskopických krytů na stroji FRP fa. TOS Kuřim [43]

5.2 Krycí měchy

Tento druh ochrany vedení je význačný především malými zástavbovými rozměry a v porovnání s teleskopickými kryty má nižšími pořizovacími náklady. Ty jsou však vykoupeny nižší odolností proti poškození. Nejrozšířenějšími materiály používanými k výrobě měchů jsou: tkanina, plast a guma. Rozlišujeme tři základní typy krycích měchů: [1] [17] [19]

- Skládací krycí měchy (Obr. 44 A) – tento typ měchů nalézá uplatnění především při ochraně před prachem, olejem a jiným znečištěním. Z důvodu snadného tepelného a mechanického poškození však není vhodný jako ochrana při působení zvýšené koncentrace třísek. [1] [19]
- Skládací krycí měchy s lamelami (Obr. 44 B) – přidané kovové lamely umožňují aplikaci měchů také v prostředí, které je exponováno třískám. [17]
- Laminátový měch (Obr. 44 C) – užíván především pro ochranu vřeten a kuličkových šroubů [17]

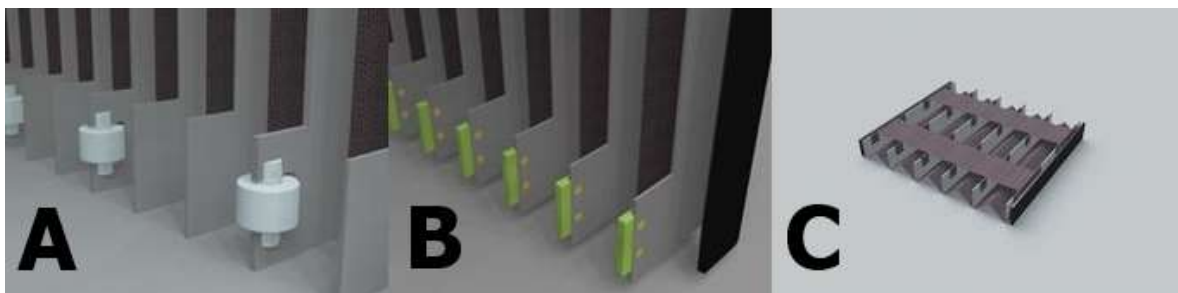


Obr. 44 Krycí měchy fa. HESTEGO [17]

S ohledem na požadované provozní podmínky, které musí z důvodu bezproblémového provozu krycí měchy splnit, se vybavují dodatečným příslušenstvím.

Jsou to především:

- Rolny (Obr. 45 A), s ohledem na hmotnost, zvýšenou rychlost a zrychlení
- Kluzáky (Obr. 45 B), pro snížení tření a aplikace s velkým počtem zdvihů a vysokou rychlostí
- Tkaninový omezovač roztahu (Obr. 45 C), pro posuvové rychlosti 60-90 m/min pro rovnoměrné rozložení hmotnosti měchu [18]



Obr. 45 : Dodatečné příslušenství měchu fa. HENNLICH [18]



Obr. 46 Aplikace krycího měchu s lamelami na stroji TESSEN fa. Fpt Industrie S.P.A [44]

5.3 Rolety

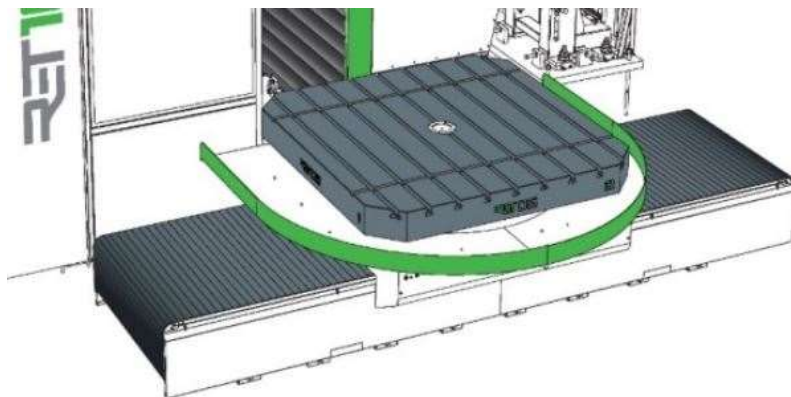
Roletové kryty (Obr. 5.3.1) mají minimální nároky na zástavbové rozměry ve stroji, ze všech výše uvedených možností ochrany vedení. Jsou ekonomicky velmi dostupné a využívají se především v aplikacích, kde není nutné dokonalé utěsnění. Provedení z oceli umožňuje bezproblémové použití také v místech disponovaných na třísky. [17]



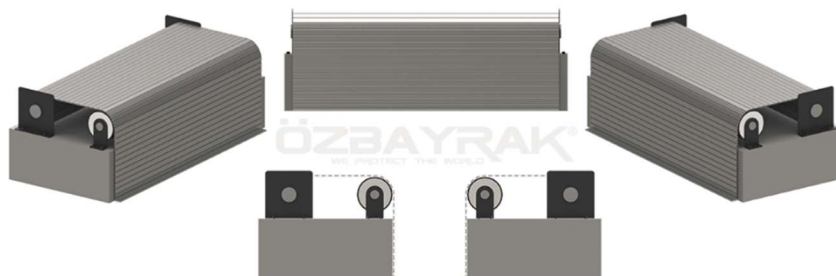
Obr. 47 Roletový kryt fa. HESTEGO [17]

5.4 Člákové zástěny

Člákové zástěny (Obr. 5.4.1) jsou význačné svojí nízkou hmotností, spolehlivostí a dlouhou životností. Díky nízké hmotnosti jsou schopny poskytnout velmi rychlou posuvovou rychlost (až 60 m/min) a zrychlení (až 2G). Jejich časté užití se v důsledku toho nalézá především na rychlostně pohybujících se strojích. V případě potřeby zajištění těsnosti proti řezné kapalině a oleji, je mezi jednotlivé hliníkové profily, tvořící zástěnu vkládána těsnící hmota zabírající průnik kapalin. [17] [20]



Obr. 48 Aplikace člákové zástěny na ose X stroje RET10X fa. RETOS [46]



Obr. 49 Čláková zástěna fa. ÖZBAYRAK [45]

5.5 Teleskopické pružiny

Teleskopické pružiny (Obr. 5.5.1), jindy nazývané také jako „spirálové kryty“ jsou vhodné především pro ochranu kuličkového šroubu a vřetene stroje. Nabízí velmi dobré těsnící vlastnosti a spolehlivou ochranu proti třískám i řezné kapalině. [17] [18]



Obr. 50 Teleskopická pružina fa. HESTEGO [17]

5.6 Stírací systémy

Nákladově, a i technicky nejméně náročným druhem ochrany vedení jsou stěrače (Obr. 5.6.1). Zabraňují průniku řezné kapaliny, třísek, prachu a jiných nečistot. Tímto výrazně přispívají k zachování přesnosti a zvýšené životnosti vodících ploch. [17]



Obr. 51 Různá tvarová provedení stěračů fa.HESTEGO [17]

6 Odměrování polohy

Kvalitu obrobku výrazně ovlivňuje také přesnost polohování stroje. K zjištění polohy stroje jsou používány snímače polohy, jejichž základním parametrem je inkrement. Inkrement lze charakterizovat jako nejmenší délkový úsek, který je schopen snímač rozlišit. Odměrování polohy lze rozdělit dle několika parametrů.

Dle způsobu:

- Přímé
- Nepřímé

Dle druhu získané informace:

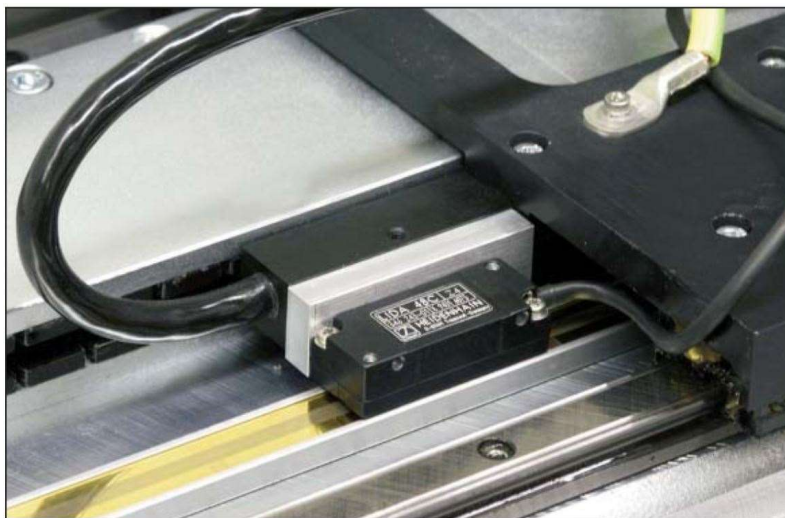
- Inkrementální
- Absolutní

Dle druhu odměrovacího signálu:

- Fotoelektrický
- Induktivní
- Magnetický
- Laserový

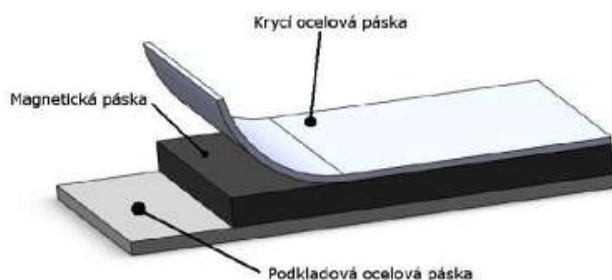
Přímé odměrování je charakteristické snímáním skutečné polohy posouvané části CNC obráběcího stroje. Naopak nepřímé odměrování funguje na způsobu, kdy se neodměřuje poloha posouvané součásti stroje, ale např. úhel natočení kuličkového šroubu.

Specifický rozdíl mezi inkrementálním a absolutním typem odměrování je uchování informace o naměřené poloze. Zatímco inkrementální typ snímače si informaci o poloze neukládá, tak snímač absolutní si naměřenou polohovou informaci zachovává, respektive ji poskytuje řídicímu systému, který ji ukládá. V případě výpadku elektrické energie tedy není nutné najetí všech os do svých referenčních souřadnic, neboť stroj zná souřadnice posouvané části stroje před výpadkem proudu. [3] [21]

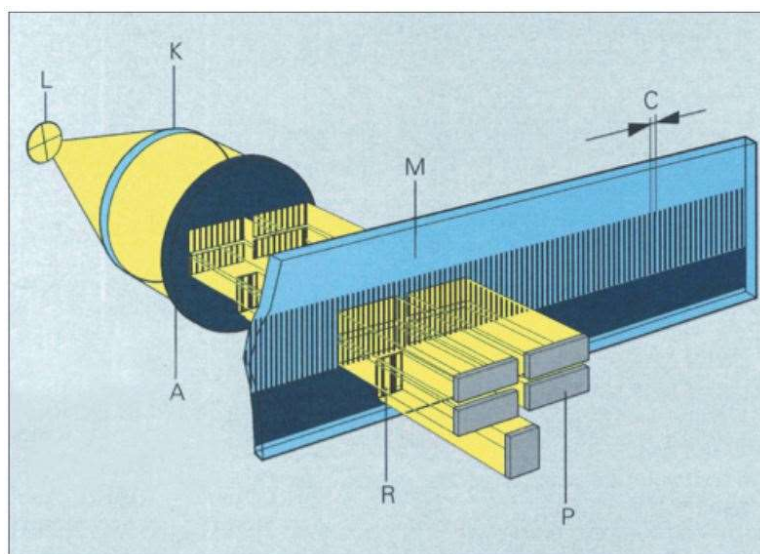


Obr. 52 Aplikace lineárního pravítka s ocelovým páskem fa HEIDENHAIN [47]

Snímat polohu je možné pomocí několika fyzikálních principů. Fotoelektrické snímání funguje na základě vyzáření světla, které prochází rastrem inkrementů vrytých do skleněného pásku. Část světla se odrazí, zbylé světlo dopadne na protilehlé fotodiody, popřípadě fototranzistory a změní se na elektrický signál obsahující již informaci o poloze. Induktivní způsob odměření signálu zase využívá elektromagnetického pole indukujícího napětí, jehož okamžitá amplituda obsahuje po převodu signálu polohovou informaci o jezdcí vůči měřítku. Magnetický druh odměřování je naopak „založen na snímání proměnného magnetického pole speciální magnetické pásky prostřednictvím snímací hlavy, která se pohybuje nad páskou ve výšce několika milimetrů.“ [22] dle Vojáčka. Laserový způsob využívá zase Dopplerova jevu. [23] [21]



Obr. 54 Struktura snímané magnetické pásky [22]



Obr. 53 Fotoelektrický princip měření se skleněným měřítkem; M - skleněné měřítko s rastrem, C - perioda rastru, A - deska snímací hlavy, L - polovodičový zdroj světla, K - kondenzátor, P - fotodiody, R - referenční značka [21]

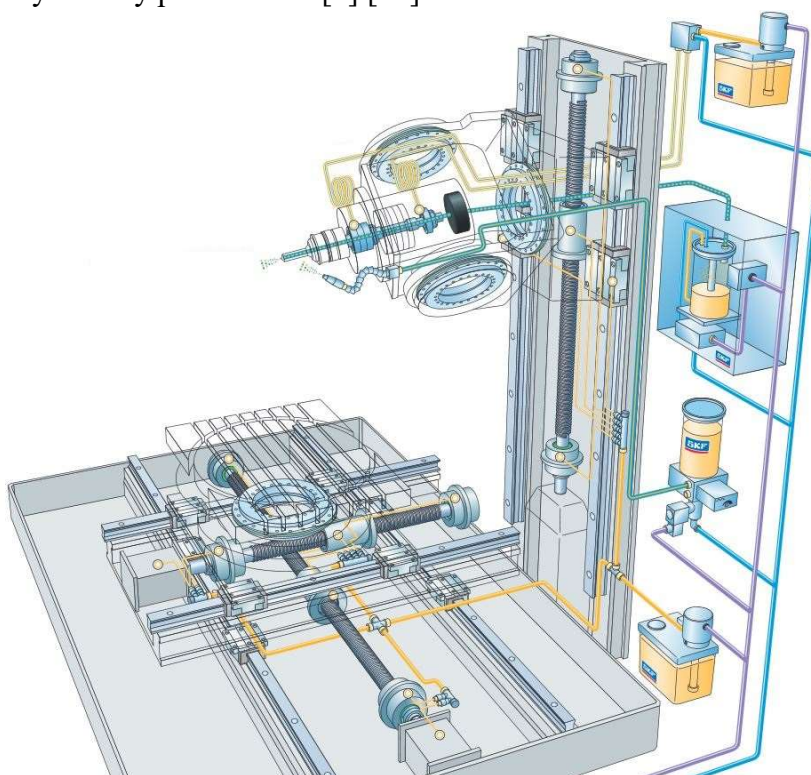
K zaručení správné funkce odměřování je třeba dbát na vhodné umístění pravítka vůči posuvovému prvku. Pro umístění platí následující pravidla:

- Z důvodu minimálního ovlivnění vůči kmitům vlivem křížení je třeba dbát na co nejmenší vzdálenost mezi posuvovým prvkem a odměřovacím zařízením
- Odměřovací zařízení umístit co nejbližší reznému procesu
- Splnění „Abbeho měřicího principu“ zdůrazňující skutečnost, že osa měřítka je pokračováním osy měření [3]

7 Mazání

Na obráběcí stroje je kladen požadavek na co nejvyšší spolehlivost, přesnost, účinnost a ekologii. Pro splnění těchto kritérií hraje zásadní roli vhodné mazání. Mazání komponent stroje nejen, že snižuje třecí odpory, ale výrazně pomáhá ke snížení opotřebení funkčních ploch. Mimo jiné může pomoci také ke snížení hlučnosti převodových mechanismů.

„V jednotlivých částech obráběcího stroje dochází k přeměně energií na tepelnou, která lokálně ohřívá jednotlivé skupiny stavby stroje.“ [3] dle Marka ze str. 154. Jeden ze způsobů, jak zajistit teplotní stabilizaci stroje, je tedy také mazání, neboť mazivo spolehlivě odvádí teplo z míst teplotně vyšších do míst teplotně nižších. Správná volba maziva a investice do mazacích systému by se tedy neměly podceňovat. [1] [24]



Obr. 55 Příklad centrálního mazání všech os obráběcího stroje fa. SKF [24]

Způsoby mazání lze rozlišit dle:

- Počtu mazaných míst
 - Centrální
 - Jednotlivé
- Mazacího média
 - Olej
 - Tuk (plastické mazivo)
- Podle oběhu mazacího média
 - Ztrátové (mazací médium oběhne mazací soustavou pouze jednou)
 - Uzavřené (mazací médium obíhá mazací soustavou stále dokola)
 - Tlakové (mazací médium proudí pod tlakem)
 - Beztlakové (mazací médium neproudí pod tlakem)

8 Kritické zhodnocení

K pohánění posuvových os strojů je nejvhodnější užití synchronního motoru. Je kompaktní a není nezbytné řešit jeho chlazení. V aplikacích vyžadujících vysoké otáčky s předpokladem přetěžování motoru (například vlivem obrábění) je naopak vhodnější užití motoru asynchronního. Vyšší výkonnostní nároky však vyžadují vhodnější umístění vzhledem k nezbytnosti dostatečného chlazení motoru, motor má mimo jiné i větší zástavbový rozměr a je nutné vybavení pohonu snímačem otáček. To má za následek jeho vyšší pořizovací náklady. Krokový pohon má velmi úzké použití, především v případě specifických jednoúčelových strojů. Dosahuje totiž nižších výkonů a otáček. Pro aplikaci náhonové jednotky vřetena je tedy ve větší míře velmi nevhodný.

Použití kuličkového šroubu a matice je velmi výhodné pro přenos velkých axiálních sil za poměrně příznivé ceny. Konstrukční řešení nabízí snadnou aplikaci nepřímého odměřování, zvyšující přesnost polohování. Na rozdíl od posuvu realizujícím se pomocí hřebenu a pastorku není třeba užití energetických řetězů. S rostoucím průměrem šroubu klesají maximální možné otáčky šroubu, tedy jeho rychlost. Ta může být někdy z hlediska požadované rychlosti CNC obráběcího stroje při použití KŠM omezující. Nevýhodou KŠM je vznikající tření mezi pohybujícími se částmi KŠM. Snižuje se tím životnost a vzniká teplo, odváděné mazivem procházejícím maticí, popř. také šroubem. Omezujícím parametrem při použití KŠM může být maximální délka zdvihu. Například fa. Shuton nabízí KŠ o maximální délce 15 000 mm z jednoho kusu. [25]

Pastorek a hřeben má v porovnání s KŠM menší převod, vyšší účinnost (až 97%) a menší tuhost. V závislosti na velikosti převodu můžeme dosáhnout výrazně lepších dynamických vlastností. [12] (Například fa. ATLANTA může díky svému technickému řešení dosáhnout posuvové rychlosti až 240 m/min při posuvu hmotnosti o velikosti přibližně 3000 kg). [26] Z důvodu nezbytnosti užití převodovky a brzdy je tohle řešení posuvu finančně nákladnější než realizace posuvu pomocí KŠM. Instalace převodovky s motorem k pastorku, tedy k suportové části stroje, způsobuje vyšší zástavbové nároky. Této skutečnosti nepomáhá ani nezbytnost užití energetických řetězů vedoucích k celé posuvové jednotce podél osy stroje. Na úkor vyšších finančních a zástavbových nároků lze však dosáhnout vyššího krouticího momentu. Užití pastorku a hřebene je tedy charakteristické především pro velké stroje s dlouhými zdvihy a vysokými požadavky na přesouvané hmoty (velká hmotnost obrobku).

Šnek a šnekový hřebel je vhodný především pro posuvové soustavy s vysokou hodnotou převodu. Z hlediska vlastností (vysoké tuhosti a minimálního tření) je nejvýhodnější užití principu hydrostatického šnekového hřebenu. Aplikace je vhodná především u těžších obráběcích strojů, kterými jsou například portálové frézky.

Hydrodynamické vedení je velmi výhodnou volbou pro stroje nevyžadující vysokou posuvovou rychlost a téměř jakékoliv zatížení. Velmi dobře tlumí vibrace vznikající při obrábění. Vysoké nároky na přesnost vodících ploch sebou nesou nezbytnou vyšší investici. Na úkor toho je však zajištěna přesnost chodu, minimální ztráty výkonu a vysoká provozní spolehlivost. Tuto investici je však přesto možné částečně snížit aplikací plastické hmoty na jednu z protilehlých stran. Daná strana vedení tím pádem nevyžaduje přesné obrobení. Největšími nevýhodami je „Slip-stick“ efekt popsán v průběhu práce dřívě a opotřebování vodících ploch vlivem provozu. Jejich renovace je však snadno proveditelná.

Hydrostatické vedení se dá označit za finančně nejnákladnější alternativu vedení stroje. Tato skutečnost je dána technologickou náročností pro udržení co nejvyššího tlumení vibrací, přesnosti chodu a provozní spolehlivosti. Na oplátku se však nabízí ve všech těchto oblastech nejlepších výsledků ze všech možných druhů vedení. Použití hydrostatického vedení není omezeno maximální pracovní rychlostí stroje, ani maximálním provozním zatížením. Má nejvyšší odolnost vůči opotřebení, neboť nedochází k přímému kontaktu vodících ploch a olejový film poskytuje nejvhodnější chlazení posuvové soustavy. Kromě ceny může být největší nevýhodou případ poruchy některého z agregátů souvisejících s použitím hydrostatického vedení a dalších nezbytných komponent (regulátory mazání, rozváděcí systém, a jiné). Vedení se v tu chvíli stává provozně velmi nespolehlivým. V praxi se hydrostatického vedení užívá především u těžších obráběcích strojů.

Valivé vedení se díky svým vlastnostem nachází na pomezí hydrodynamického a hydrostatického vedení. Umožňuje realizaci vyšší posuvové rychlosti než vedení hydrodynamické, délka zdvihu není omezena a odolnost vůči opotřebení je podstatně vyšší. Výhodná je také skutečnost nižších nároků přesnosti ploch, na které dosedají jednotlivé protikusy valivého vedení, možnost předepnutí a nejmenší možná ztráta výkonu během posuvu. Aplikace je velmi vhodná pro stroje s vysokými nároky na rychlost posuvu a také pro stroje s dlouhými zdvihy.

Aplikace aerostatického vedení není v oblasti konstrukce CNC obráběcích strojů příliš častá. Může být však velmi výhodná pro menší přesné stroje s vysokými nároky na čistotu prostředí nevyžadující vysokou tuhost.

Kombinované vedení má velmi specifické užití využívající výhod výše uvedených druhů vedení. V praxi se často využívá kluzně-valivá kombinace vedení pro účinnější zachycení klopného momentu.

Volba typu ochrany vedení je úzce spjata s dostupnými zástavbovými rozměry dané posuvové osy a samozřejmě také s finančními prostředky. Nejdostupnější a efektivní ochranou jsou stěrače. Jejich potenciálu je proto výhodné využít v každém konstrukčním řešení. Nejvhodnější se z hlediska životnosti, spolehlivosti a odolnosti jeví teleskopické kryty. Jsou bezproblémově použitelné ve všech osách a vyšší pořizovací náklady jsou investicí navracující se jejich přednostmi. Alternativním řešením teleskopických krytů především v Y ose stroje (stojan) jsou krycí měchy s lamelami. Jsou především cenově dostupnější a mohou často vyřešit i nedostatečně velký zástavbový prostor pro teleskopický kryt v oblasti stojanu. Velmi zajímavým řešením ochrany vedení, především pro rychloposuvové stroje mohou být článkové zástěny. Výrobci obráběcích strojů však nejsou doposud příliš užívány a nelze tedy jednoznačně potvrdit jejich spolehlivost.

Při konstruování CNC obráběcího stroje je třeba dbát na vhodné umístění (řídící se svými pravidly) a správnou volbu odměřovacího zařízení. Pro polohování pracovních stolů stroje je jednoznačně doporučeno užití absolutního přímého odměřování. Je výrazně přesnější a v případě výpadku elektrické energie nevyžaduje najetí referenčních poloh. Nepřímé odměřování je naopak vhodné pro méně náročné aplikace, ve kterých nezáleží na přesném polohování. Přesnost měření může být totiž ovlivněna dilatacemi odměřované komponenty (kuličkový šroub, hřídel motoru, a jiné).

Ve stavbě obráběcích strojů je na místě nepodcenit roli mazacích systémů a volbu použitého maziva. Vhodně zvolené mazání zvýší efektivitu stroje a prodlouží i jeho životnost. Použití olejového mazacího média nabízí díky jeho menší hustotě snadnější přístup do míst tření a s tím i související lepší odvod tepla. Tukové mazací médium může však mít díky tužší konzistenci výhodu v efektivnější ochraně komponent vůči průniku nečistot a větší intervalů mazání.

Je nezbytné si uvědomit až zásadní skutečnost. Nelze jednoznačně určit který druh maziva je nejlepší. Stejně tak nelze jednoznačně určit, který typ ochrany vedení, nebo vedení samotného a všech jiných charakteristik, kterými se tato práce zabývá, je ten nejlepší. Každý druh aplikace se vyznačuje svými klady a zápory. Tvůrce nejen CNC obráběcího stroje musí tedy zaujmout postoj na základě principu co nejvyšší vhodnosti a priorit vycházejících z konkrétních požadavků vyvíjeného stroje.

Závěr

Na počátku této bakalářské práce bylo cílem vysvětlení pojmu CNC obráběcího stroje a uvedení jejich rozdělení podle několika hledisek. Následující část práce měla za cíl čtenáři přiblížit obecný postup návrhu náhonové jednotky stroje. Prezentovaný postup respektoval splnění výkonnostních i rychlostních požadavků a zahrnoval také vliv provozního ohřevu a s tím související výkonnostní ztráty. Poté byly charakterizovány jednotlivé druhy náhonových jednotek úzce spjatých s komponentami realizující posuv přesouvané části stroje. Tyto komponenty, kterými se konkrétně rozumí kuličkový šroub a matice, pastorek a hřeben, šnek a šnekový hřeben byly taktéž popsány. Byl tak úspěšně splněn další předem určený cíl. Někomu by v práci mohly chybět způsoby připojení náhonové jednotky ke komponentám realizující samotný posuv. Druhy připojení, případně řešení pomocí převodů ale nebyly předmětem zájmu zadání mé práce. Touto oblastí jsem se proto nezabýval.

Následující stěžejní část práce se zabývala druhy vedení a její ochranou před poškozením. Neboť je vhodná volba vedení jedním z určujících parametrů pro pracovní přesnost stroje, tedy kvality obrobku, byl na tyto kapitoly kladen velký důraz. Na kvalitě obrobku se ovšem podepisuje i přesnost polohování. Z tohoto důvodu bylo pojednáno také o druzích a principech odměřování polohy. Téměř závěrečnou část práce jsem krátce věnoval mazání stroje, které je jedním z klíčů ke zvýšení efektivity a životnosti stroje.

Poznatky, především nejdůležitější specifické výhody a nevýhody jednotlivých témat kterými jsem se ve své práci zabýval jsem zanesl do části kritického shrnutí. V této části může čtenář nalézt také doporučené oblasti užití jednotlivých řešení. Práce byla tedy svým tématem zaměřená především na konstruktéry a projektanty CNC obráběcích strojů, ale také na studenty oboru výrobních strojů. Věřím však, že cenné informace a možná i nápady pro nová inovativní řešení zde nalezne i mnohem širší spektrum lidí.

Seznam použité literatury

- [1] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. 1. Praha: MM publishing, 2014, 684 s. : il. ISBN 9788026067801.
- [2] *Factory Automation.cz: Časopis o automatizaci a robotice* [online]. 2014, **2014**(8) [cit. 2016-11-27]. ISSN 2533-4271. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/co-jsou-to-cnc-stroje-zjistete-co-umi/>
- [3] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2, přeprac., rozš. Praha: MM publishing, 2010, 420 s. : il. ISBN 9788025479803.
- [4] BRENÍK, Přemysl a Josef PÍČ. *Obráběcí stroje. Konstrukce a výpočty*. 2. oprav. vyd. Praha: SNTL, 1986, 573 s.
- [5] AC Servo Motor Alpha-is/Alpha-i Descriptions, GFZ-65262EN/03 - 65262EN.pdf. In: *JAMET INC* [online]. Burleson: JAMET INC, 2012 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: http://www.dermako.com/Fanuc_Web_Manuals/Drives_Current/65262EN.pdf
- [6] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické servopohony*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2001, 86 s. ISBN 8021419784.
- [7] Ploché lineární motory : Produkty: HENNLICH. *HOME: HENNLICH* [online]. Litoměřice: HENNLICH s.r.o., 2016 [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/linearni-vedeni-valiva-motory-a-pohony-linearni-motory-3034/ploche-linearni-motory.html>
- [8] Princip přímého pohonu lineárním motorem - Inovativní řízení pohybu ETEL. *Řešení pohybu - Pohybové systémy - řízení pohybu - přímý pohon - Inovativní řízení pohybu ETEL* [online]. Môtiers: ETEL S.A., 2016 [cit. 2017-02-09]. Dostupné z: <http://www.etel.ch/cz/linearni-motory/princip/>
- [9] Lineární motory I RAVEO s.r.o. *RAVEO s.r.o. I WORLD OF MOTION* [online]. Otrokovice: RAVEO s.r.o., 2016 [cit. 2017-02-09]. Dostupné z: <http://www.raveo.cz/linearni-motory>
- [10] Kuličkové šrouby - KSK Precise Motion, a.s. *KSK Precise Motion, a.s.* [online]. Kuřim: KSK Precise Motion, a.s., c1996-2017 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://www.ksk-pm.cz/kulickove-srouby/>
- [11] MAREK, Jiří a Milan NOVÁČEK. KULIČKOVÉ ŠROUBY A MATICE VE STAVBĚ CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ ČÁST 4. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015, **2015**(6), 10-11 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: http://www.ksk-pm.cz/fileadmin/user_upload/Ostatni_pdf_soubory/Napsali_o_nas/2015_serial_KSM_4.pdf

- [12] BORSKÝ, Václav. *Základy stavby obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. Brno: VUT, 1991. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0361-6.
- [13] Ozubené hřebeny a pastorky I RAVEO s.r.o. *RAVEO s.r.o. I WORLD OF MOTION* [online]. Otrokovice: RAVEO s.r.o., 2017 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <http://www.raveo.cz/hrebeny-pastorky>
- [14] LAŠOVÁ, Václava. *Základy stavby obráběcích strojů*. 1. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. ISBN 978-80-261-0126-0.
- [15] Chapter 8. Models of Friction. *Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika tanszék - Introduction* [online]. Budapešť: Faculty of mechanical engineering, department of mechatronics, optics and mechanical engineering informatics, b.r. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/robot_applications/ch07.html
- [16] Lineární vedení valivé: Produkty: HENNLICH. *HOME: HENNLICH* [online]. Litoměřice: HENNLICH s.r.o., 2017 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/linearni-vedeni-valiva-motory-a-pohony-linearni-vedeni-valive-26.html>
- [17] HESTEGO - Teleskopické kryty. *HESTEGO - zpracování plechu a výroba ochranných komponentů pohyblivých částí strojů* [online]. Vyškov: HESTEGO, c2008-2016 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: <http://www.hestego.cz/krytovani-stroju>
- [18] Krytování strojů a třískové hospodářství: Produkty: HENNLICH. *HOME: HENNLICH* [online]. Litoměřice: HENNLICH s.r.o., 2016 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/krytovani-stroju-a-triskove-hospodarstvi-81.html>
- [19] Reko s.r.o. - Ochranné kožené a plastové krycí měchy. *Reko s.r.o. - Výroba, prodej a servis dopravních pásů, hnacích řemenů* [online]. Jaroměř: Reko s.r.o., c2015-2016 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: <http://www.reko-sro.cz/ochranne-a-kryci-mechy.htm>
- [20] *Machine Covers -DEFENDER* [online]. Taipei: DEFENDER, 2013 [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: <http://www.machine-cover.com/aluminum-alloy-apron-roller-covers.html>
- [21] Časopis Automa Odměrování lineární polohy u obráběcích strojů. *Časopis Automa časopis pro automatizační techniku* [online]. Děčín: Automa – časopis pro automatizační techniku, s. r. o., 2014 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/odmerovani-linearni-polohy-u-obrabecich-stroju-2014_04_52629_7896/
- [22] Odměrování polohy s přesností na 0,001 mm I Automatizace.HW.CZ. *Automatizace.HW.CZ I Elektronika v automatizaci* [online]. Praha: HW server s.r.o., 2014 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/odmerovani-polohy-s-presnosti-na-0001-mm>
- [23] Lineární odměrování a indikátory polohy. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2002 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/linearni-odmerovani-a-indikatory-polohy.html>

- [24] S CB M PF X 3 v04 I 2008-10-08 - 6917_CS_6_-HI.pdf. In: *SKF.com* [online]. Praha: SKF Group, 2009 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: http://www.skf.com/binary/tcm:12-152647/6917_CS_6_-HI.pdf
- [25] Shuton - Kuličkový šroub v délce 15 metrů z jednoho kusu. *Shuton - PŘESNÉ KULIČKOVÉ ŠROUBY* [online]. Legutio: SHUTON, S.A., b.r. [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: <http://www.shuton.com/novinky/kulik-rov-v-delce-15-metr-z-jednoho-kusu>
- [26] ATLANTA Drive Systems, Inc. Rack & Pinion Drive Systems. *ATLANTA Drive Systems, Inc. - The World Leader in Rack & Pinion Drive Technologies* [online]. Farmingdale: ATLANTA Drive Systems, Inc., 2013 [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: <http://www.atlantadrives.com/systems.htm>
- [27] INA Germany I Press Office I Hydrostatic compact guidance system HLE 4.0 - for active control of axes. In: *INA Germany I* [online]. Herzogenaurach: Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG, 2017 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.ina.de/content.ina.de/en/press/press-releases/press-details.jsp?id=71206977>
- [28] FERMAT vystavuje na největším pobaltském veletrhu - Fermat machinery blog. *Fermat Machinery blog - Vše, co potřebujete vědět o strojích* [online]. Praha: FERMAT CZ s.r.o., 2015 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://novinky.fermatmachinery.com/fermat-vystavuje-na-nejvetsim-pobaltskem-veletrhu/>
- [29] Servomotors 1FT7 - Motors - Siemens. In: *Home - English - Siemens Global Website* [online]. Munich: Siemens AG, 1996-2017 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://w3.siemens.com/mcms/mc-solutions/en/motors/motion-control-motors/simotics-s-servomotors/simotics-s-1ft7/pages/simotics-s-1ft7.aspx>
- [30] HEIDENHAIN Motors - 208893-2R_HEIDENHAIN-Motors.pdf. In: *Home - HEIDENHAIN* [online]. Traunreut: HEIDENHAIN, 2016 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: http://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/208893-2R_HEIDENHAIN-Motors.pdf
- [31] KM Series Stepper Motors I Kollmorgen I High Torque Stepper Motors Stepping Step. In: *Motion Control Solutions I Kollmorgen I Industrial Servo Drives AC DC Motors* [online]. Radford: Kollmorgen, 2013 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.kollmorgen.com/en-us/products/motors/stepper/hi-torque/km-series/>
- [32] Válcové kuličkové šrouby. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2015 [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/valcovane-kulickove-srouby.html>
- [33] Low-backlash planetary gearhead - WITTENSTEIN alpha GmbH. *WITTENSTEIN alpha GmbH* [online]. Igersheim: WITTENSTEIN SE, 2017 [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: <http://alpha.wittenstein.de/en-en/products/servo-gearheads/low-backlash-planetary-gearheads/>

- [34] Gearing up for efficiency I Electromechanical content from Power Electronics. *Power Electronics I Home* [online]. PENTON MEDIA, INC., 2017 [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: <http://powerelectronics.com/electromechanical/gearing-efficiency>
- [35] REDEX: MSR. *REDEX ANDANTEX, high-tech planetary servo-reducers and drives, backlash free rack and pinion drives* [online]. Marsberg: REDEX GmbH, 2017 [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: <http://www.redex-andantex.com/p-exp-862-%E2%80%A2-msr-turntable-drive.html>
- [36] *Sbližování teorie s praxí: Moderní konstrukční řešení CNC strojů* [online]. In: . Uherské Hradiště: Střední odborná škola technická Uherské Hradiště, 2012 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <http://www.uh.cz/szesgsm/files/sblizovani/pdf/mod-konstr-cnc.pdf>
- [37] Vodorovná vyvrtávačka WHN(Q) 13/15 CNC - TOS Varnsdorf a.s. *VÍTEJTE - TOS Varnsdorf a.s.* [online]. Varnsdorf: TOS VARNSDORF a. s., 2017 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <https://www.tosvarnsdorf.cz/cz/produkty/horizontalni-vyvrtavacky-stolove/whnq-13-15-cnc/#prettyPhoto>
- [38] VAVŘÍK, Ivan, Petr BLECHA a Josef HAMPL. *VÝROBNÍ STROJE A ZAŘÍZENÍ: Sylabus přednášek pro kombinované bakalářské studium*. Brno, 2002. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [39] SAFOP - equipments. In: *SAFOP - Macchine Utensili* [online]. Pordenone: SAFOP S.P.A., 2017 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.safop.com/eng/popup/leonard1.htm>
- [40] Lineární vedení. *LOŽISKA. distributor ložisek, strojních součástí, ložisek, lineární techniky - Puma MB* [online]. Benátky nad Jizerou: PUMA MB, a.s., 2013 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.pumamb.com/index.php/produkty/linearni-vedeni>
- [41] *LINEÁRNÍ VEDENÍ: Intelligence in motion*. Aktualizované vydání. Brno: HIWIN s.r.o., 2016. Dostupné také z: <http://www.hiwin.cz/cz/download>
- [42] T4HD-XL I IMTS GmbH: Contour and roughness measurement devices. In: *IMTS GmbH: Contour and roughness measurement devices I Industrial metrology* [online]. Laufenburg: IMTS GmbH, 2016 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.imts.ch/en/t4-hd-xl/>
- [43] Portálová obráběcí centra - TOS KUŘIM – OS, a.s. In: *Úvod - TOS KUŘIM – OS, a.s.* [online]. Brno: TOS KUŘIM – OS, a.s., © 1820–2016 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://www.tos-kurim.cz/cz/reference/portalova-obrabeci-centra>
- [44] FPT Industrie SpA - North America I Prodotti - Horiz. milling machines - Tessen. In: *FPT Industrie SpA - North America I Boring machine, milling machine, five axis machining center* [online]. Venezia: Fpt Industrie S.P.A., 2014 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: http://www.fptindustrie.com/en/detail/horiz._milling_machines/tessen/12/
- [45] *Özbayrak* [online]. Bursa: Özbayrak Protection Technology Industry CO., 2016 [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: <http://www.ozbayrak.com.tr/products/aluminum-covers/flexible-aluminum-covers.html>

- [46] Горизонтально-расточной станок в крестообразном исполнении RET10X. In: *ПИТЕРМАШ* [online]. Saint Petersburg: ПИТЕРМАШ, с2009-2017 [cit. 2017-04-14].
Dostupné z: http://www.pitermash.ru/catalog/gorizontarno_rastochnie_stanki/gorizontarno_rastochnie_stanki_retos_czech_republic/gorizontalniy_rastochnoy_stanok_v_krestoobraznom_ispolnenii_ret10x
- [47] Exposed Linear Encoders - 208960-2D_Exposed_Linear_Encoders_01.pdf. In: *HOME: O firmě - HEIDENHAIN* [online]. Praha: HEIDENHAIN s.r.o., 2016 [cit. 2017-04-17].
Dostupné z: http://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/208960-2D_Exposed_Linear_Encoders_01.pdf

Seznam použitých zkratk a symbolů

AC	Asynchronní motor	
CNC	Computer Numerical Control	
DC	Dynchronní motor	
fa.	Firma	
HB	Tvrdost podle Brinella	
HRC	Tvrdost podle Rockwella	
KŠ	Kuličkový šroub	
KŠM	Kuličkový šroub a matice	
NC	Numerical Control	
Δp	tlakový spád	[Pa]
ϵ_m	úhlové zrychlení	[rad·s ⁻²]
η	dynamická viskozita	[Pa.s]
b	šířka kapsy	[m]
f_{mech}	mechanická frekvence	[Hz]
f_o	Součinitel tření za klidu	[-]
F	zatěžující síla	[N]
h	výška olejové vrstvy	[m]
J_{rhm}	celkový moment setrvačnosti redukovaný na hřídel motoru	[Nm]
k_{MAT}	tuhost matice	[Nm ⁻¹]
k_{sr}	tuhost šroubu	[Nm ⁻¹]
l	délka posuvu vykonaná za otáčku motoru	[m]
L	délka kapsy	[m]
m	přesouvaná hmota	[kg]
m_{sr}	hmota šroubu	[kg]
M_{ef}	efektivní momentu motoru	[Nm]
M_j	dílčí moment během cyklu motoru	[Nm]
M_{mdyn}	celkový dynamický moment zátěže	[Nm]
M_{zdrhm}	celkový moment zátěže redukovaný na hřídel motoru	[Nm]
M_{zsrhm}	celkový statický moment zátěže redukovaný na hřídel motoru	[Nm]
M_F	třecí moment	[Nm]
M_G	moment potřebný k překonání odporu ve vedení	[Nm]
M_{GT}	moment tíhové složky	[Nm]
M_{KSM}	moment od předepnutí KŠM	[Nm]
M_L	moment od třecích sil v ložisku	[Nm]
Q	průtok	[L.s ⁻¹]
t_j	čas působení momentu	[s]
T	celkový čas	[s]
V_m	otáčky motoru při rychloposuvu	[min ⁻¹]
V	rychlost obrobku při rychloposuvu	[m/min]

Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení CNC obráběcích strojů [3]	11
Obr. 2 Ukázka CNC obráběcího stroje - vodorovné vyvrtávačky WFC 10 fa. FERMAT [28]	11
Obr. 3 Schéma výpočtového modelu při realizaci posuvu pomocí KŠM [3]	12
Obr. 4 Synchronní motory SIMOTICS S-1FT7 fa. SIEMENS [29]	15
Obr. 5 Srovnání momentové charakteristiky AC a DC motoru [3]	15
Obr. 6 Asynchronní motory typu QAN fa. HEIDENHAIN [30]	16
Obr. 7 Krokové motory typu KM fa. KOLLMORGEN [31]	16
Obr. 8 Princip lineárního motoru (překlad: Lamination stack - kluzák , Magnets – magnety, Cable – přívodní kabel, Magnetic way – magnetická dráha) [8]	17
Obr. 9 Lineární motor typu LMS fa. ETEL [8]	17
Obr. 10 Znázornění oběhu kuliček mezi kuličkovým šroubem a maticí [32]	18
Obr. 11 Převádění kuliček v KŠM A – deflektor, B – převáděcí kanál, C – převáděcí trubky [3]	18
Obr. 12 Průběh účinnosti KŠM (zelené křivky) a průběh účinnosti trapézových kluzných šroubů (fialové křivky) při rotaci šroubu [11]	19
Obr. 13 Dovolené otáčky KŠ v závislosti na způsobu uložení [1]	20
Obr. 14 Pastorek s planetovou převodovkou RP+ od fa. Wittenstein Alpha a hřeben s přímými zuby [33]	22
Obr. 15 Způsoby vymezení vůle mezi pastorkem a hřebenem [1]	22
Obr. 16 Mechanické vymezení vůle mezi pastorkem a hřebenem [12]	23
Obr. 17 Průběh děje vymezení vůle metodou Master-Slave [34]	23
Obr. 18 Ukázka metody Master Slave v aplikaci pro rotační pohyb fa. Redex [35]	23
Obr. 19 Znázornění provedení varianty A a B [36]	24
Obr. 20 Hydrostatický šnek a šnekový hřeben s vyobrazeným odměřováním polohy - Resolverem, sběrným místem oleje a tlakovým obvodem mazání [36]	24
Obr. 21 Druhy vedení lineárních posuvových soustav [3]	25
Obr. 22 Zobrazení závislosti součinitele tření na rychlosti s grafickým srovnáním výsledků mezi hydrodynamickým a hydrostatickým vedením [3]	26
Obr. 23 Přehled materiálů užívaných pro vodící plochy [1]	27
Obr. 24 Princip aplikování umělé kašovité směsi [12]	27
Obr. 25 Základní tvarová provedení Zleva: ploché, prizmatické, rybinové, kruhové (válcové) [14]	28
Obr. 26 Užití plochého typu kluzného vedení pro stojan [37]	28
Obr. 27 Vymezení vůle vedení pomocí stavěcí klínové lišty (vlevo) a přítlačné dolní lišty (vpravo) [38]	29
Obr. 28 Hagenův-Poiseuillův vztah pro hydrostatické vedení [1]	29
Obr. 29 Způsoby zásobování kapes olejem [1]	30
Obr. 30 Hydrostatické vedení v aplikaci s kluznou plochou [39]	30
Obr. 31 Uzavřené hydrostatické vedení [3]	31
Obr. 32 Otevřené hydrostatické vedení [3]	31
Obr. 33 Řešení hydrostatického vedení pomocí kolejnice a vozíku fa. Schaeffler Technologies [27]	31
Obr. 34 Nákras otevřeného a uzavřeného typu valivého vedení [3]	32
Obr. 35 Schématické zobrazení vedení s omezenou délkou zdvihu [12]	33

Obr. 36 Válečkové valivé vedení klecové s omezeným zdvihem fa. PUMA MB [40]	33
Obr. 37 Kolejnice s valivým hnízdem a vyobrazeným oběhem válečků ve dvou skloněných drahách fa. Schaeffler Technologies [16]	33
Obr. 38 Způsob upevnění paralelního vedení pro stroj s rázy a vibracemi za použití přitlačných šroubů doporučovaný fa. HIWIN [41]	34
Obr. 39 Způsob upevnění paralelního vedení s jednou referenční dorazovou hranou pro stroj bez rázů a vibrací doporučovaný fa. HIWIN [41].....	34
Obr. 40 Další způsoby upevnění paralelního vedení pro stroj s rázy a vibracemi za použití přitlačných šroubů a přitlačných klínů doporučovaný fa. HIWIN [41]	34
Obr. 41 Čtyř-osé měřicí centrum fa. IMTS [42]	35
Obr. 42 Ukázka dodatečného příslušenství teleskopických krytů fa. HENNLICH [18]	36
Obr. 43 Aplikace teleskopických krytů na stroji FRP fa. TOS Kuřim [43].....	37
Obr. 44 Krycí měchy fa. HESTEGO [17].....	37
Obr. 45 : Dodatečné příslušenství měchu fa. HENNLICH [18]	38
Obr. 46 Aplikace krycího měchu s lamelami na stroji TESSEN fa. Fpt Industrie S.P.A [44]	38
Obr. 47 Roletový kryt fa. HESTEGO [17].....	39
Obr. 48 Aplikace článkové zástěny na ose X stroje RET10X fa. RETOS [46]	39
Obr. 49 Článková zástěna fa. ÖZBAYRAK [45].....	39
Obr. 50 Teleskopická pružina fa. HESTEGO [17]	40
Obr. 51 Různá tvarová provedení střechařů fa.HESTEGO [17]	40
Obr. 52 Aplikace lineárního pravítka s ocelovým páskem fa. HEIDENHAIN [47].....	41
Obr. 53 Fotoelektrický princip měření se skleněným měřítkem; M - skleněné měřítko s rastrem, C - perioda rastru, A - deska snímací hlavy, L - polovodičový zdroj světla, K - kondenzátor, P - fotodiody, R - referenční značka [21]	42
Obr. 54 Struktura snímané magnetické pásky [22]	42
Obr. 55 Příklad centrálního mazání všech os obráběcího stroje fa. SKF [24]	43

Seznam tabulek

Tabulka 1 Možnosti vymezení vůle mezi maticí a šroubem [3]	20
Tabulka 2 Způsoby uložení KŠM [3].....	21